

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

HRVOJE LONČAREVIĆ

# **REZANJE MATERIJALA VODENIM MLAZOM**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2016

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

HRVOJE LONČAREVIĆ

## **REZANJE MATERIJALA VODENIM MLAZOM**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Predavač:

Tomislav Božić, dipl.ing.strojarstva

Karlovac, 2016



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J. J. Strossmayera 9  
HR • 47000 Karlovac • Croatia  
tel. +385 (0)47 843-510  
fax. +385 (0)47 843-579  
e-mail: [referada@vuka.hr](mailto:referada@vuka.hr)



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

**Stručni / specijalistički studij:**.....Strojarstvo  
(označiti)

Usmjerenje:.....Proizvodno strojarstvo .Karlovac, ...05.05. 2016.....

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:.....Hrvoje Lončarević..... Matični broj: 0110609059

Naslov: Rezanje materijala vodenim mlazom

Opis zadatka:

U završnom radu opisati povjesni razvoj metoda rezanja vodenim mlazom . Nastavno razvoju metode obraditi varijante rezanja sa i bez abraziva kao i tehnološke mogućnosti rezanja drugim postupcima poput lasera ili plinskog rezanja.. Opisati pojedinačne komparativne prednosti metoda i ograničenja za pojedinačne obrade rezanja. U praktičnom dijelu rada izraditi tehnologiju rezanja jednostavnog dijela čelične konstrukcije (prirubnički spoj) sa normativima izrade načinima vodenim rezanjem i klasičnom strojnom obradom. Komparacijom rezultata sa osnove kvalitete izrade spomenutim metodama kao i normativa utrošenih u izradu zaključiti optimum cijene i kvalitete..

Zadatak zadan:

05.05.2016

Mentor:

Rok predaje rada:

10.06.2016.

Predviđeni datum obrane:

15.06.2016.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## ***IZJAVA:***

Izjavljujem da sam ja – student Hrvoje Lončarević, OIB:75093833204, matični broj: 0110609059, upisan kao apsolvent akademske godine 2014/2015, radio ovaj rad samostalno, koristeći se stečenim znanjem tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć mentora Tomislava Božića, mag.ing.stroj. i kod eksperimentalnog dijela tvrtki Konid-proces kojima ovim putem zahvaljujem.

Hrvoje Lončarević

---

## ZAHVALA

Veliko hvala mentoru Tomislavu Božiću, dipl.ing. za pomoć koju mi je pružio svojim znanjem, savjetima i susretljivošću pri izradi ovoga rada.

Također zahvaljujem poduzeću Konid-proces na izradi eksperimentalnog dijela rada, korisnim savjetima te ustupljenim materijalima.

Najviše zahvaljujem svojim roditeljima, djevojci i obitelji na pruženoj potpori i razumijevanju tokom studiranja.

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA .....	III
SAŽETAK .....	IV
SUMMARY .....	V
1. UVOD .....	1
2. OSNOVNA PODJELA OBRADE VODENIM MLAZOM .....	3
2.1. Obrada čistim vodenim mlazom .....	3
2.2. Abrazivni vodeni mlaz .....	5
2.2.1. Ubrzanje abrazivnih čestica .....	8
3. FAKTORI UTJECAJA NA KVALITETU POVRŠINE .....	9
3.1. Hidrodinamički faktori .....	10
3.2. Faktori miješanja vode i abraziva .....	10
3.3. Tehnološki faktori .....	10
4. TEHNOLOGIJA REZANJA MATERIJALA MLAZOM VODE .....	12
4.1. Sustav pripreme vode .....	12
4.1.1. Dorada vode .....	13
4.1.2. Generator tlaka .....	13
4.2. Sustav dodavanja abraziva .....	16
4.3. Rezna glava za obradu vodenim abrazivnim mlazom .....	18
4.3.1. Vodena mlaznica.....	19
4.3.2. Abrazivna mlaznica .....	19
5. GREŠKE NASTALE PRILIKOM OBRADE VODENIM MLAZOM .....	21
6. OBRADA LASEROM.....	24
6.1. Vrste lasera .....	24
6.1.1. CO <sub>2</sub> laser.....	25
6.1.1.1 Difuzno hlađeni CO <sub>2</sub> laseri.....	25
6.1.1.2. CO <sub>2</sub> Slab laser.....	25
6.1.1.3. Zatvoreni CO <sub>2</sub> laser .....	26
6.1.2. Laser s krutim medijem (Nd:YAG).....	27
6.1.2.1. Štapni laseri .....	28
6.1.2.2. Impulsni laseri .....	28
6.1.3. Disk laser .....	28
6.1.4. Fiber laseri visoke snage .....	29

7. REZANJE LASEROM .....	31
7.1. Lasersko rezanje taljenjem.....	31
7.2. Lasersko rezanje isparavanjem.....	32
7.3. Lasersko rezanje izgaranjem.....	33
8. PARAMETRI OBRADJE LASEROM.....	34
8.1. Snaga lasera .....	34
8.2. Brzina rezanja .....	34
8.3. Plin za rezanje.....	34
8.4. Žarišna duljina .....	34
8.5. Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada .....	34
9. USPOREDBA POSTUPKA OBRADJE VODENIM MLAZOM I LASERSKOM OBRADOM .....	35
10. EKSPERIMENTALNI DIO .....	38
10.1. Oprema za rezanje.....	38
10.2. Tehnološki proces izrade priрубnice.....	41
11. ZAKLJUČAK .....	50
12. LITERATURA.....	51

## POPIS SLIKA

Slika 1. Rezna glava za obradu čistim vodenim mlazom .....	4
Slika 2. Struktura vodenoga mlaza .....	5
Slika 3. Oblici abrazivnog vodenog mlaza .....	6
Slika 4. Princip odnošenja materijala .....	6
Slika 5. Abrazivna rezna glava .....	8
Slika 6. Tehnologija rezanja materijala abrazivnim vodenim mlazom .....	12
Slika 7. Pojačivač tlaka .....	14
Slika 8. Klipna pumpa .....	14
Slika 9. Akumulator pritiska .....	15
Slika 10. Veliki i mali spremnik abraziva .....	16
Slika 11. Vrste abraziva .....	17
Slika 12. Optimalan protok abraziva .....	17
Slika 13. Izgled abrazivne rezne glave .....	18
Slika 14. Dijamantna vodena mlaznica .....	19
Slika 15. Karbidne abrazivne mlaznice različitih duljina .....	20
Slika 16. Zaostajanje mlaza .....	21
Slika 17. Utjecaj brzine i tlaka na stvaranje brazdi .....	22
Slika 18. Utjecaj brzine obrade na izbrazdanost površine reza .....	22
Slika 19. Stožasti rez .....	23
Slika 20. Pogreške unutarnjeg kuta .....	23
Slika 21. Shema i princip rada CO <sub>2</sub> lasera .....	25
Slika 22. Princip rada slab lasera .....	26
Slika 23. Zatvoreni CO <sub>2</sub> laser tvrtke Rofin .....	26
Slika 24. Princip rada lasera s čvrstim medijem Nd:YAG .....	27
Slika 25. Kristal okruglog štapnog oblika .....	28
Slika 26. Disk laser .....	29



Slika 27. TRUMPF TruLaser 5030 fiber laser .....	30
Slika 28. Princip rezanja laserom .....	31
Slika 29. Lasersko rezanje taljenjem .....	32
Slika 30. Lasersko rezanje isparavanjem .....	32
Slika 31. Lasersko rezanje izgaranjem (kisikom) .....	33
Slika 32. Prikaz zone utjecaja topline pri obradi laserom .....	35
Slika 33. Element izrezan abrazivnim vodenim mlazom .....	36
Slika 34. Element izrezan laserom .....	37
Slika 35. Stroj WJS NC 3015 E .....	38
Slika 36. Upravljačka jedinica stroja .....	39
Slika 37. Pumpa Streamline SL-V 50 .....	39
Slika 38. Primjer pozicioniranja programom Lantek radi veće iskoristivosti ploče .	41
Slika 39. Izgled crteža u programu Lantek .....	43
Slika 40. Sučelje upravljačke jedinice .....	45
Slika 41. Gornja i donja strana probijenog materijala.....	45
Slika 42. Prednji pogled sužavanja reza .....	46
Slika 43. Rezanje provrta promjera 14 mm.....	46
Slika 44. Izrezana priрубnica.....	47
Slika 45. Pogreška nastala pri obradi promjera promjera 14 mm .....	47
Slika 46. Zaostajanje mlaza prilikom obrade priрубnice .....	48
Slika 47. Referentni list programa Lantek.....	49

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Područje primjene rezanje mlazom vode .....	3
Tablica 2. Područje primjene vodno-abrazivnog mlaza.....	5
Tablica 3. Brzina rezanja .....	7
Tablica 4. Faktori vodno-abrazivnog mlaza .....	9
Tablica 5. Načini tretiranja vode .....	13
Tablica 6. Vrste i karakteristike abrazivnih mlaznica.....	20
Tablica 7. Usporedba mogućnosti obrade laserom i vodenim mlazom .....	36
Tablica 8. Tehnička specifikacija pumpe .....	40
Tablica 9. Dimenzije ravne priрубnice .....	42
Tablica 10. Parametri obrade .....	44

## SAŽETAK

Tehnologija obrade vodenim i abrazivno vodenim mlazom zbog povećanih zahtjeva tržišta je jedna od nekonvencionalnih tehnologija čija je primjena sve više prisutna u strojogradnji. Obrada vodenim mlazom je hladna obrada pri kojoj ne dolazi do zagrijavanja što je naročito korisno za čelike koji su namijenjeni za toplinsku obradu. Ovim postupkom moguće je rezanje gotovo svih vrsta materijala: toplinski vodljivih metala, reflektirajućih što je s drugim metodama poput lasera gotovo nemoguće. Obrada vodenim mlazom je unatoč svojoj velikoj proizvodnosti veoma jednostavan postupak, a njenom primjenom smanjuju se i troškovi alata. Takav sustav obrade zahtijeva vrlo visoki tlak kojim se formira mlaz velike snage za rezanje nemetalnih materijala, dok je za metalne i tvrde materijale potreban abraziv koji se miješa s vodom. Primjenom optimalnih parametara moguće je postići kvalitetno obrađenu površinu, smanjiti troškove i pojavu pogrešaka koje su karakteristične za ovu obradu.

Obrada laserom također ima važnu ulogu u strojogradnji zbog visoke produktivnosti i univerzalnosti. Laser je izvor intenzivne svjetlosti određene valne duljine, te je najsuvremeniji izvor toplinske energije koji se koristi u obradi odvajanjem. Danas je primjena lasera sastavni dio suvremene tehnike u području telekomunikacija, medicinske tehnike, mjerne tehnike, tehnologija obrade raznih materijala. U strojarstvu se laser koristi za više postupaka poput: rezanja, bušenja, zavarivanja, ispisivanja oznaka i natpisa, poboljšavanja svojstva površine. Rezanje laserom ograničeno je za materijale visokog stupnja refleksije i toplinske vodljivosti. Primjena lasera nije moguća ukoliko obradak ne smije biti izložen utjecaju topline. Obrada laserom je znatno brža nego kod rezanja abrazivnim vodenim mlazom što doprinosi njenoj ekonomičnosti.

Eksperimentalnim dijelom zadatka prikazana je tehnologija rezanja pri izradi priрубnice na stroju za abrazivno vodeno rezanje u tvrtki Konid-proces u Zagrebu, a na temelju viđene tehnologije i komparacije procesa dan je odgovarajući zaključak.

Ključne riječi: Waterjet, Abrasive waterjet, Rezanje vodenim mlazom, Rezanje abrazivnim mlazom, Laser, Laser cutting, CO<sub>2</sub> laser

## SUMMARY

Water jet and abrasive water jet machining process due to the increased demands of the market is one of the unconventional technologies whose applications are increasingly present in mechanical engineering. Water jet machining is cold process in which there is no heating, which is particularly useful for steels that are intended for heat treatment. Through this process it is possible to cut all types of materials: a heat conductive metal, reflective, which is with other methods such as laser almost impossible. Processing water jet machining despite its large productivity is very simple procedure, and its application reduces costs of tools. Such a processing system requires a very high pressure jet which is formed of high power for cutting non-metallic materials, while the metal and harder materials need abrasive to be mixed with water. By applying the optimum parameters it is possible to achieve high-quality surface treatment, reduce the costs and occurrence of errors that are characteristic of this treatment.

Laser machining process also has an important role in engineering because of high productivity and universality. A laser is source of intense light of a specific wavelength, and the most advanced source of thermal energy which is used in machining. Today, the use of lasers is integral part of modern techniques in the field of telecommunications, medical technology, measurement techniques, processing technology for various materials. In mechanical engineering, the laser is used for multiple operations such as: cutting, drilling, welding, printing labels and signs, improvement of surface feature. Laser cutting is limited to materials of high reflectance and thermal conductivity. The use of lasers is not possible if the workpiece should not be exposed to the heat. Laser processing is much faster than the abrasive water jet cutting, which contributes to its economy.

The experimental part of the task shows cutting technology in the preparation of the flange on the machine for abrasive water jet cutting in the company Konid-process in Zagreb, and based on the seen technology and comparing processes is given an appropriate conclusion.

## 1. UVOD

Suvremeni tehnološki razvoj u svijetu karakterizira pronalazak velikog broja materijala koji nalaze primjenu u raznim vrstama ljudske djelatnosti a samim time dolazi do potrebe stalnog tehnološkog razvoja te poboljšanja uvjeta proizvodnje i uvođenja inovacija u procese obrade odvajanjem materijala kako bi se postigla što veća tržišna konkurentnost.

Kod većine suvremenih materijala obrada kovencencionalnim tehnologijama predstavlja veliki problem zbog loma i trošenja alata, neekonomičnosti ili čak nemogućnosti obrade. To je uvjetovalo pojavu novih nekonvencionalnih tehnologija obrade, kod kojih se obrada izvodi bez uobičajenih ograničenja u odnosu na svojstvo obradivosti materijala.

Novi nekonvencionalni postupci obrade su postupci kod kojih se uklanjanje viška materijala, izmjena oblika, dimenzija i strukture materijala ostvaruje korištenjem električne, kemijske, svjetlosne, magnetske, nuklearne i drugih oblika energije, dovedenih neposredno u proces-zonu rezanja. Izbor postupaka vrši se pomoću višekriterijskog odlučivanja uzimajući u obzir ograničenja u materijalima i postojećoj tehnologiji. Jedna od nekonvencionalnih metoda obrade materijala je upotreba vode kao sredstva za obradu. Obrada vodenim mlazom pod visokim tlakom primjenjuje više od 20 godina kod rezanja, izrezivanja, odrezivanja i razdvajanja materijala. Također se koristi i za potrebe čišćenja i skidanja oštih rubova. To je hladni postupak što znači da nema pojave topline pa se može koristiti gdje drugi postupci nisu uporabljivi. Svoju primjenu danas nalazi u mnogim granama industrije kao što su: strojogradnja, metalurgija, rudarstvo, građevinska industrija, kemijska industrija, prehrambena industrija, elektroindustrija, industrija gume i plastike, tekstilna industrija i konfekcija, industrija nemetala (staklo, azbest) te u medicini za određene vrste operativnih zahvata.

Rezanje vodenim mlazom pod visokim pritiskom proces je erozije. Velika brzina vodenog mlaze stvorena je puštanjem vode kroz mali otvor iz spremnika pod tlakom pri čemu dolazi do udara mlaza u površinu obradka. Tijekom tog procesa kinetička energija se pretvara u tlačnu energiju što uzrokuje oštećenje materijala i stvaranje mikropukotina koje se šire pod dinamičkim opterećenjem mlaza. Širenju mikropukotina doprinosi i turbulentno strujanje tekućine u pukotinama kao i kavitacijsko djelovanje nastalih plinskih mjehurića te pod djelovanjem vode dolazi do odvajanja i odnošenja materijala. Rezanje mlazom vode bez abraziva je pogodno za rezanje mekših materijala (papir, drvo, koža, spužva, PVC, nylon). Ukoliko je dodan abraziv vodenom mlazu mogu se obrađivati tvrdi materijali. Osnovna razlika ovih procesa je u tome da se pri abrazivnom vodenom mlazu ubrzavanje abrazivnih čestica vrši vodenim mlazom te čestice pri velikoj brzini udaraju u materijal te dolazi do nastanka pukotina koje se pod djelovanjem vode dodatno šire i odnosi materijal.

Prvi patent za korištenje vodenog mlaza u nekoj proizvodnji pojavio se u SSSR-u 1936. godine. Zaposleni u rudnicima ugljena u Ukrajini koristili su vodeni mlaz za ispiranje ugljena iz raznesenih stijena. Kasnije su fokusirani vodeni mlaz koristili i za kopanje rupa u stijenama za postavljanje eksploziva u rudnicima. Tako je zbog sve veće potrebe za rudom urana 50-ih i 60-ih godina prošlog stoljeća nastao interes za ovom metodom iskopavanja

rude. Najveći problem pri iskopavanju urana je bila njegova radioaktivnost no taj problem je riješen tako što se umjesto klasičnih metoda iskopavanja koristila metoda iskopavanja vodenim mlazom.

Krajem 60-ih godina prošlog stoljeća Robert Franz sa Sveučilišta Michigan upotrebljava visokotlačni mlaz za rezanje drveta. Kompanija koja je poznata kao prvi veći industrijski korisnik vodenog mlaza je Cartney Manufacturing Company, koja je 1972. godine vodenim mlazom rezala višeslojne papirnate cijevi. Prvu komercijalnu pumpu za rezanje vodenim mlazom počela je 1971. godine proizvoditi američka kompanija Flow Research. 1982. godine njena sestrinska kompanija WTI (Waterjet Technology Inc.), otkrila je i patentirala postupak pri kojem se vodi u izlaznoj mlaznici dodaje abrazivno sredstvo. Postupak je nazvan rezanje s abrazivnim vodenim mlazom. Usavršavanjem sustava i razvojem računalne tehnologije danas je moguće obrađivati skoro sve vrste materijala.

Prednosti ovakvog načina obrade materijala je u tome što su smanjeni troškovi alata. Zbog minimalnih sila rezanja (5 do 130 N) nije potrebno stezanje obradka kao ni označavanje i markiranje. Tako obrađena površina nema zaostalih naprezanja i deformacija. Obrada različitih materijala vrši se bez mijenjanja opreme i alata, a kvaliteta reza je ista za sve slojeve materijala. Gubitci materijala su vrlo mali kao i sama debljina reza. Moguće je rezanje gotovo svih vrsta materijala osim kaljenog stakla zbog njegove površinske napetosti zbog čega će pri rezanju doći do lomljenja na sitne komadiće. Kod rezanja vodenim mlazom nemamo zone utjecaja topline (ZUT) te se obrađuje bez očvršćenja materijala, stvaranja otrovnih plinova, taljenja i savijanja. Također se mogu obrađivati elementi koji su prethodno bili toplinski tretirani. Upravljanje strojem je relativno jednostavno unatoč velikoj moći stroja koji može rezati gotovo sve, a siguran je za operatera jer nije potrebno izlagati ruke u blizini rezne glave koja obrađuje. Kod ove obrade je zahvalno to što je ekološki prihvatljiva. Abraziv se reciklira pa ga je moguće ponovno iskoristiti dok se voda, ukoliko se obrađuju opasniji materijali, reciklira na propisani način. Zbog uskog reza materijala koji iznosi otprilike 0,5 mm nemamo velikih gubitaka materijala što je sa financijskog aspekta velika prednost kada obrađujemo skuplje materijale poput titana. Kvaliteta obrađene površine najvećim dijelom ovisi o parametrima obrade koji su određeni programski. Glavni parametri su tlak vode, posmična brzina mlaza, protok abraziva, promjer vodene mlaznice i abrazivne mlaznice te debljina i vrsta obrađivanog materijala.

Pogreške koje su karakteristične za ovu obradu su brazde koje nastaju na obrađivanoj površini, zaostajanje mlaza, hrapavost površine.

## 2. OSNOVNA PODJELA OBRADE VODENIM MLAZOM

Podjela obrade vodenim mlazom vrši se na dva postupka a to su obrada čistim vodenim mlazom (WJM, Water Jet Machining) i obrada abrazivnim vodenim mlazom pri kojem je dodano abrazivno sredstvo (AWJM, Abrasive Water Jet Machining). Princip nastajanja mlaza kod oba postupka je sličan i zasniva se na stvaranju visokog tlaka vode pomoću pumpe visokog tlaka te se vodovima visokog tlaka ta voda dovodi do sapnice malog promjera. Izlazom iz sapnice formira se čisti vodeni mlaz ili abrazivni vodeni mlaz visokog tlaka i brzine koja je 2,5 puta veća od brzine zvuka.

### 2.1. Obrada čistim vodenim mlazom

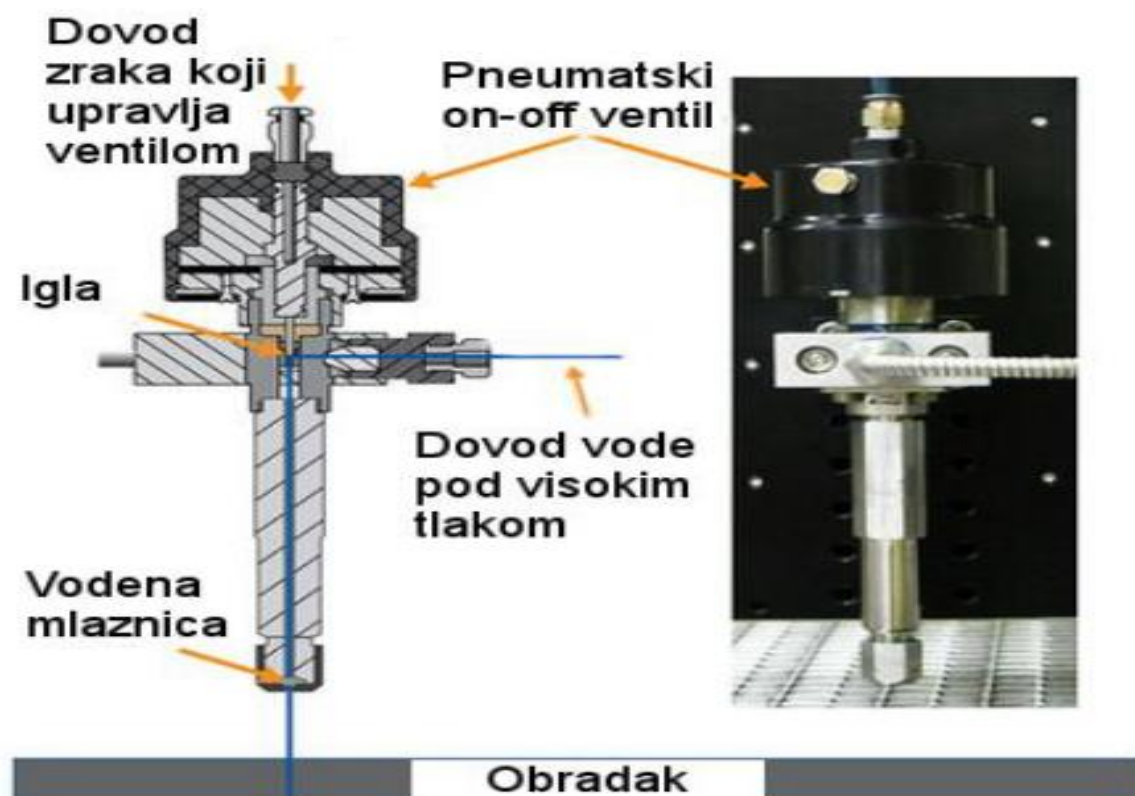
Čisti vodeni mlaz ne sadrži abrazive i koristi se pri rezanju mekših organiskih i anorganskih materijala, a najčešće papira, tekstila, drveta, kože i spužve. Ovakav vodeni mlaz osim za rezanje može se koristiti za potrebe čišćenja i pripremu površine.

Tablica 1. Područje primjene rezanje mlazom vode [2]

Primjena običnog vodenog mlaza	Područje primjene
1. Rezanje plastike	Plastična industrija
2. Rezanje papira i celuloze	Industrija papira
3. Rezanje vlakana i tekstila	Tekstil i odjeća
4. Rezanje gume i kože	Industrija gume, proizvodnja obuće
5. Rezanje hrane	Prehrambena industrija
6. Rezanje drveta i šperploče	Šumarstvo
7. Rezanje krutog goriva i leda	Šumarstvo, ukrasna industrija

Zbog svoje ograničene primjene pri rezanju materijala, danas se većinom upotrebljavaju strojevi za obradu sa abrazivnim vodenim mlazom budući da se oni mogu koristiti i bez dodatka abraziva te se samim time proširuje područje primjene. Obje obrade spadaju u mehaničke postupke obrade. Princip djelovanja vodenog mlaza je vrlo jednostavan. Voda pod visokim tlakom od 1400 do 4000 bara se preko visokotlačne cijevi dovodi do rezne glave u kojoj se nalazi vodena mlaznica koja može biti dijamantna ili safirna. Danas se najčešće izrađuju dijamantne sapnice budući da su do deset puta trajnije od safirnih. Dijamantne sapnice je moguće više puta očistiti te imaju koherentan mlaz. Njihova cijena je i do deset puta veća nego safirne sapnice, ali se njome smanjuje vrijeme prekida rada i servisa. Mlaznica je vrlo malog promjera (0,1 mm do 0,4 mm). Istjecanjem vode iz mlaznice malog promjera formira se uzak mlaz vrlo velike brzine. Pri udaru vodenog mlaza u

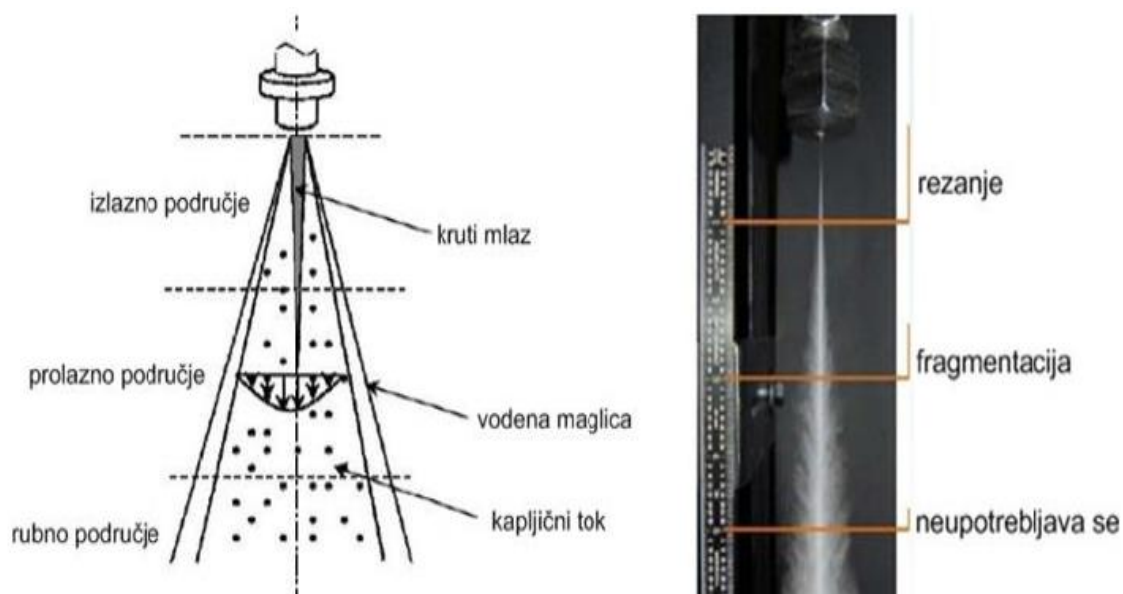
obradak dolazi do stvaranja visokog tlaka na maloj površini obradka uslijed čega na materijalu nastaju oštećenja, a bočni udarni valovi dovode do brzog razaranja materijala na granicama kristalnih zrna i do pojave mikropukotina. Zbog dinamičkog opterećenja koje nastaje djelovanjem mlaza, mikropukotine se brzo šire što dovodi do trenutnog lokalnog razaranja materijala obradka. Tome doprinosi i turbulentno strujanje tekućine u pukotinama kao i kavitacijsko djelovanje nastalih plinskih mjehurića. Sam proces rezanja nastaje tako što se prvo stvara udubljenje koje se postepeno pretvara u otvor koji se širi i stvara se rezni procjep. Prevladajući faktori koji utječu na učinkovitost i kvalitetu rezultata su tlak vode, promjer mlaznice, brzina mlaza i udaljenost mlaznice od obradka. Na slici je prikazana rezna glava za rezanje čistim vodenim mlazom koja se sastoji od dovoda zraka, igle, dovoda vode pod visokim tlakom i vodene mlaznice.



Slika 1. Rezna glava za obradu čistim vodenim mlazom

Vodeni mlaz se pri izlasku na zračnu atmosferu rasprši. Njegova struktura može se podijeliti na krutu fazu koja se koristi za rezanje te drugu prolaznu fazu u kojoj nastaje vodena maglica. Područje vodenog mlaza u kojem nastaje vodena maglica namijenjeno je za fragmentaciju. Kada vodeni mlaz prijeđe u kapljični tok gubi se snaga i više nije upotrebljiv u proizvodnji. Na slici je prikazana struktura vodenoga mlaza te iz nje možemo vidjeti koji se dijelovi mlaza mogu iskoristiti za rezanje i fragmentaciju te dio mlaza koji se ne upotrebljava pri obradi.





Slika 2. Struktura vodenoga mlaza

## 2.2 Abrazivni vodeni mlaz

Abrazivna obrada vodenim mlazom omogućava raznovrsnost obrade ali se njegova primjena proširuje na tvrde i puno čvršće materijale. Ovom obradom moguće je rezanje skoro svih materijala kao što su: svi metali uključujući i legure na bazi titana i nikla, kamen, tehnička keramika, beton, plastične mase, impregnirani i složeni materijali, laminati te organski materijali te staklo ali je iznimka kaljeno staklo koje se zbog svoje površinske napetosti razbije na sitnije komadiće.

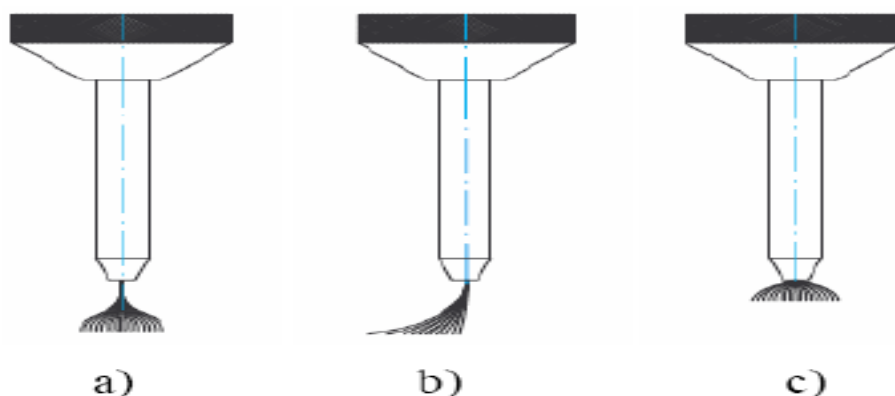
Tablica 2. Područje primjene vodno-abrazivnog mlaza

Primjena vodno-abrazivnog mlaza	Područje primjene
1. Rezanje titana, aluminija, inoxa, čelika visoke čvrstoće, legura	Zrakoplovstvo, automobilska industrija, brodogradnja, proizvodnja mostova i sl.
2. Rezanje stakla, armirano staklo, laminarno staklo	Staklarstvo, dekoracije, promotivni materijal
3. Rezanje kompozitnih materijala, keramike, magnetskih materijala	Zrakoplovstvo, automobilska industrija, keramika, elektronička industrija
4. Zavod za građevinske materijale, beton	Građevinska industrija
5. Rezanje istrošenog goriva (šipke), grafitne	Nuklearne elektrane
Primjena u drugim područjima	Područje primjene
1. Rezanje betona i cementa	Cementna industrija, građevinarstvo, demontaža
2. Za rezanje kamena	Rudarstvo, obrada kamena
3. Za rezanje otpada	Ekologija
4. Rezanje malih tunela	Građevinarstvo

Kod ovog postupka obrade postoje dva načina stvaranja mlaza a to su:

- a) Prethodno stvoren mlaz, to je suspenzijski mlaz koji nastaje na principu injektora, tako što sam vodeni mlaz usisava abrazivno sredstvo i miješa ga s vodom, a zatim se takav mlaz fokusira u sapnici. Tlak u sustavu je do max. 700 bara. Koristi se za rezanje betona do 1 m debljine i 3 mm širine reza.
- b) Injektorski mlaz, bolji je za primjenu kod tehnologije obrade. Sastoji se od 10% vode, 1% abrazivnog sredstva i ostalo je zrak. Mlaz je tanak, debljina reza je oko 1 mm. Tlak vode je 3000 do 3500 bara, potrošnja vode je 2 do 4 l/min i abrazivnog sredstva 0,2 do 1 kg/m.

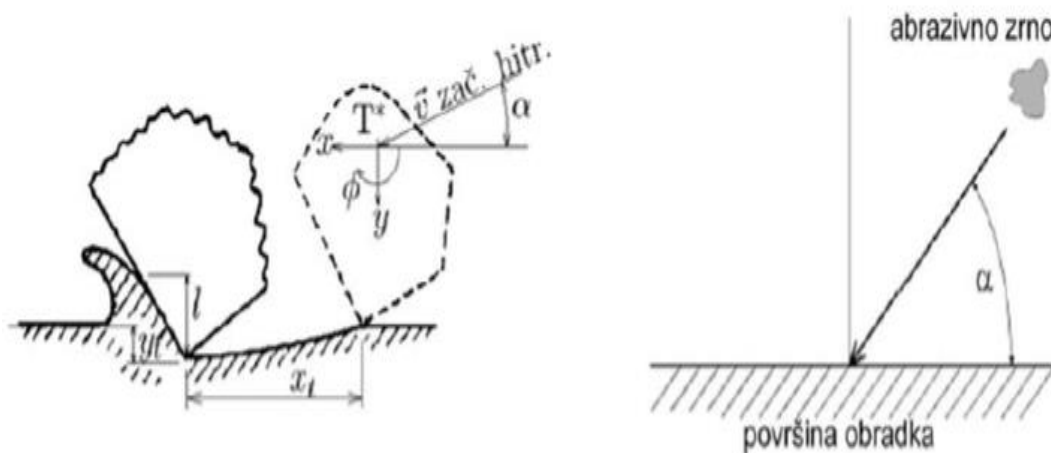
Prilikom rezanja abrazivnim vodenim mlazom jako važno da su mlaznica i cijev za miješanje dobro centrirane, jer o tome ovisi izgled abrazivnog vodenog mlaza, a samim time i kvaliteta obrade. Pod a) je prikazan dobar izgled mlaza koji je fokusiran u svom reznom području, dok pod b) i c) prikazana je izgled lošeg mlaza



Slika 3. Oblici abrazivnog vodenog mlaza

Količina odnošenja materijala pri obradi abrazivnim vodenim mlazom ovisna je o brzini abrazivnog zrna, kutu ulaska zrna u materijal, tvrdoći abrazivnog zrna, tvrdoći materijala obrade i obliku abrazivnog zrna.

Na slici 4 je prikazan princip odnošenja materijala abrazivnim vodenim mlazom



Slika 4. Princip odnošenja materijala

Na proces rezanja abrazivnim vodenim mlazom utječe veliki broj faktora. Kvaliteta reza koju opisuje geometrija i hrapavost površine ovisna je o faktorima procesa rezanja kao što su: brzina rezanja, tlak vode, vrsta abraziva, količina čestice abraziva, maseni protok abraziva, promjer mlaznice, razmak između rezne glave i obradka te debljina obradka.

Brzina rezanja važan je parametar obrade, jer utječe na kvalitetu reza, ali i na trošak obrade. Ona je ovisna o debljini, tvrdoći i vrsti materijala koji se obrađuje. Brzina rezanja predstavlja brzinu relativnog pomicanja rezne glave u odnosu na obradak u pravcu rezanja dok je pravac pomoćnog kretanja rezne glave okomit na pravac strujanja mlaza. Podešavanje brzine rezanja vrši se da bi se optimizirali rezultati procesa rezanja za različite debljine obradka a time se i ostvaruje željena kvaliteta reza pri zadanim vrijednostima tlaka vode i masenog protoka abraziva.

Tablica 3. Brzina rezanja

Parametri obrade	Promj mlaznice (mm)	0,23		0,33		0,46		0,56	
	Količina dodatog abraziva (kg/min)	0,23		0,68		0,91		1,46	
	Tlak vode (bar)	3100		2400		2400		2400	
Debljina materijala (mm)		1,6	3,2	6,4	12,7	19	25,4	50,8	100
Brzina rezanja (mm/min)	Mjed	762	457	254	102	25	13	8	3
	Aluminij	2030	1270	762	457	305	203	152	102
	Bakar	1020	559	305	152	75	38	15	3
	Ugljični čelik	1270	762	508	305	203	152	75	25
	Korozivno otporan čelik	762	610	486	254	152	102	57	25

### 2.2.1. Ubrzanje abrazivnih čestica

Kod vodenoga mlaza s dodatkom abraziva specifično je ubrzanje abrazivnih čestica koje započinje zahvaćanjem abraziva u komori za miješanje. Zbog razlike u brzini abraziva i strujanja vodenog mlaza dolazi do ubrzanja čestica koje nastaje između visokobrzinskog vodenog mlaza i cijevi za fokusiranje. Tijekom ubrzanja, abrazivne čestice i okrnjene abrazivne čestice lokalno ometaju protok vode i dolazi do smanjenja protoka vode. Primjenom cijevi za fokusiranje koja je veće duljine može se ubrzati abraziv u prosjeku od 50% brzine protoka vode. Gubitak kinetičke energije vode, uzorkovan lomom čestica na površini cijevi za fokusiranje, rezultira značajnim smanjenjem brzine abraziva, koje mogu biti preniske za učinkovito rezanje radnog radnog komada. Tijekom kontakta abrazivnih čestica i unutrašnje površine cijevi za fokusiranje događa se dodatno usporavanje tako da možemo zaključiti da ubrzanje počinje u konusnom dijelu cijevi za fokusiranje gdje se skuplja abraziv. Tijekom početne faze ubrzanja čestica i formiranja mlaza postoji tzv. konstantno klizanje mlaza kroz rezu glavu. Zbog visoke brzine mlaza vode koja protječe kroz komoru za miješanje, uslijed venturi efekta, zrak se uvlači u struju. Venturi efekt postoji u komori za miješanje jer je zrak stlačen u mlazu vode. S jedne strane protok zraka prekida mlaz vode, stoga bi trebao biti minimiziran, a s druge strane zrak omogućava zahvat abraziva mlazom vode u komori za miješanje. Na slici je prikazan izgled abrazivne rezne glave i njenih elemenata. Vodena mlaznica (2) ubrzava vodu koja je dovedena u rezu glavu pod visokim pritiskom (1) te dolazi do miješanja vode i abraziva u komori za miješanje (3). Abrazivna mlaznica (4) mješavinu vode i abraziva fokusira na obradak i izlazom mlaza stvara se koherentni mlaz velike brzine koji je 100 do 1000 puta veće snage od običnog vodenog mlaza. Na slici 5 prikazan je presjek abrazivne mlaznice (lijevo) s pripadajućim dijelovima, a s desne strane se nalazi abrazivna mlaznica u procesu obrade.



Slika 5. Abrazivna rezna glava

### 3. FAKTORI UTJECAJA NA KVALITETU POVRŠINE

Kao i u svakoj obradi materijala uz pravilnu primjenu parametara obrade moguće je postići kvalitetno obrađenu površinu uz optimalan utrošak energije. Prilikom rezanja materijala kvaliteta reza ovisi o hidrodinamičkim faktorima i direktnim faktorima. Hidrodinamički faktori se svrstavaju u grupu indirektnih faktora koji uključuju: hidraulične faktore, faktore miješanja i faktore abraziva dok se pod direktne (tehnološke) faktore ubrajaju: brzina posmaka rezne glave, smjer posmaka, broj prolaza, udaljenost mlaznice od obrađivanog materijala te napadni kut mlaza. Prema drugim istraživanjima postoje i treći faktori koji utječu na kvalitetu reza a to su: vibracije rezne glave, odnosno dinamičko ponašanje mlaza vode pri rezanju.

Tablica 4. Faktori vodno-abrazivnog mlaza

Faktori	Tip	Oznaka	SI jedinica
Hidraulični	Tlak pumpe	P	Mpa
	Promjer vodene mlaznice	$d_0$	m
Miješanja	Promjer cijevi za fokusiranje	$d_f$	m
	Smjer dodavanja abraziva	$s_a$	°
	Duljina cijevi za fokusiranje	$l_f$	m
Abraziva	Maseni protok abraziva	$m_a$	kg/s
	Vlažnost abraziva		
	Promjer čestice	$d_p$	m
	Materijal abraziva		
	Tvrdoća abraziva	$H_p$	
Tehnološki	Brzina posmaka	V	m/s
	Broj prolaza	$n_p$	
	Smjer posmaka	$s_p$	°
	Udaljenost	z	m
	Kut nagiba	j	°

### **3.1. Hidrodinamički faktori**

TLAK FLUIDA je najvažniji hidrodinamički faktor zbog značajnog utjecaja na proces rezanja materijala. Porastom tlaka, doseg mlaza se povećava može dovesti do veće posmične brzine rezne glave. Pored fizikalno-mehaničkih svojstva materijala koji se reže tlak fluida ovisi i o drugim faktorima kao što su: brzina posmaka rezne glave, maseni protok abraziva i unutarnjem promjeru cijevi.

PROMJER MLAZNICE je drugi važan faktor na koji se mora obratiti pažnja budući da o njemu ovisi kinetička energija vodno-abrazivnog mlaza. Zbog smanjenja promjera cijevi za fokusiranje u odnosu na veličinu komoru za miješanje dolazi do ubrzavanja abrazivnih čestica. Brzina strujanja abraziva povećava se porastom brzine čestica u vodenom mlazu zbog veće kinetičke energije. Stoga će doći do dubljeg prodiranja u materijal.

### **3.2. Faktori miješanja vode i abraziva**

PROMJER CIJEVI ZA FOKUSIRANJE bitan je za usmjeravanje abrazivnih čestica u smjeru radnog komada. Poprečni presjek cijevi se smanjuje što utječe na smanjivanje protoka i osigurava fokusiranje abrazivnih čestica na obradak. Kako bi postigli pravilan rad stroja fokusirajuće cijevi, unutarnji promjer cijevi za fokusiranje mora biti i do pet puta veći od promjera abrazivnih čestica. Preporuča se korištenje kraćih cijevi za fokusiranje jer daju kontinuiran mlaz. Trenje koje djeluje na unutrašnjoj stijenci cijevi rezultira nižom brzinom protoka pa će utjecaj trenja na protok kod kraće cijevi biti manji. Nemogućnost pravilnog miješanja abrazivnih čestica zbog njihove velike brzine i stvaranja vodene maglice dovodi do tiskanja čestica budući da se one kreću od stanja mirovanja. To tiskanje i ubrzanje abraziva utječe na kontakt abraziva i unutarnje stijenke cijevi za fokusiranje koja ih vraća natrag u mlaz. Sudari čestica se ponavljaju sve dok se smjer brzine abrazivnih čestica ne uputi paralelno smjeru toka vode.

MASENI PROTOK ABRAZIVA u obradi abrazivnim vodenim mlazom ima veoma važnu ulogu jer je kontakt abrazivne čestice i radnog materijala presudan za učinkovitost obrade. Osim kontakta abraziva i materijala bitna je i brzina te učestalost abraziva. Brzina abrazivnih čestica izaziva udar i prijenos kinetičke energije čestica u materijal. Učestalost udara povećava količinu prijenosa energije, a time dolazi do povećavanja dubine reza. Povećanjem masenog protoka abraziva raste i energija potrebna za rezanje ali kod većeg masenog protoka biti će veći broj sudara čestica tako da će to rezultirati gubitkom kinetičke energije a samim time i do manje stvarne brzine rezanja.

### **3.3. Tehnološki faktori**

BRZINA POSMAKA značajno utječe na nepravilnosti rezanja materijala tako da male promjene brzine mogu doprinjeti nejednolikosti morfologije površine i vrijednosti hrapravosti. Dužim zadržavanjem rezne glave nad određenim mjestom na obradku dobit ćemo dublji rez jer čestice imaju dovoljno vremena za prodor u sloj materijala. Ovim uvjetima rezanja dobit ćemo bolju mikrostrukturu površine. Mikro-pukotine počinju se stvarati u obradku pod utjecajem vode iz mlaza. Širenjem mikro-pukotina i njihovim

spajanjem dio materijala će se odvojiti od početnog što će dovesti do povećanja dubine reza.

SMJER POSMAKA je usko povezan sa smjerom doziranja abraziva, gustoćom abrazivnih čestica i kinetičkom raspodjelom abrazivnih čestica u vodno-abrazivnom sustavu.

UDALJENOST MLAZNICE OD OBRATKA u kombinaciji s drugim faktorima, utjecaj ovog faktora još nije dovoljno istražen. U prilog značaju ovog faktora za razvoj razmatrane tehnologije ide njegov utjecaj na kvalitetu reza.

KUT NAGIBA prilikom rezanja materijala najčešće se koristi kut nagiba osi rezne glave od  $90^\circ$  u odnosu na obradak. Ovaj kut ima najveći utjecaj kod rezanja abrazivnim mlazom. Povećanjem brzine posmaka rezne glave dolazi do kašnjenja mlaza te je u tom slučaju pogodnije uzeti kut nagiba manji od  $90^\circ$ .

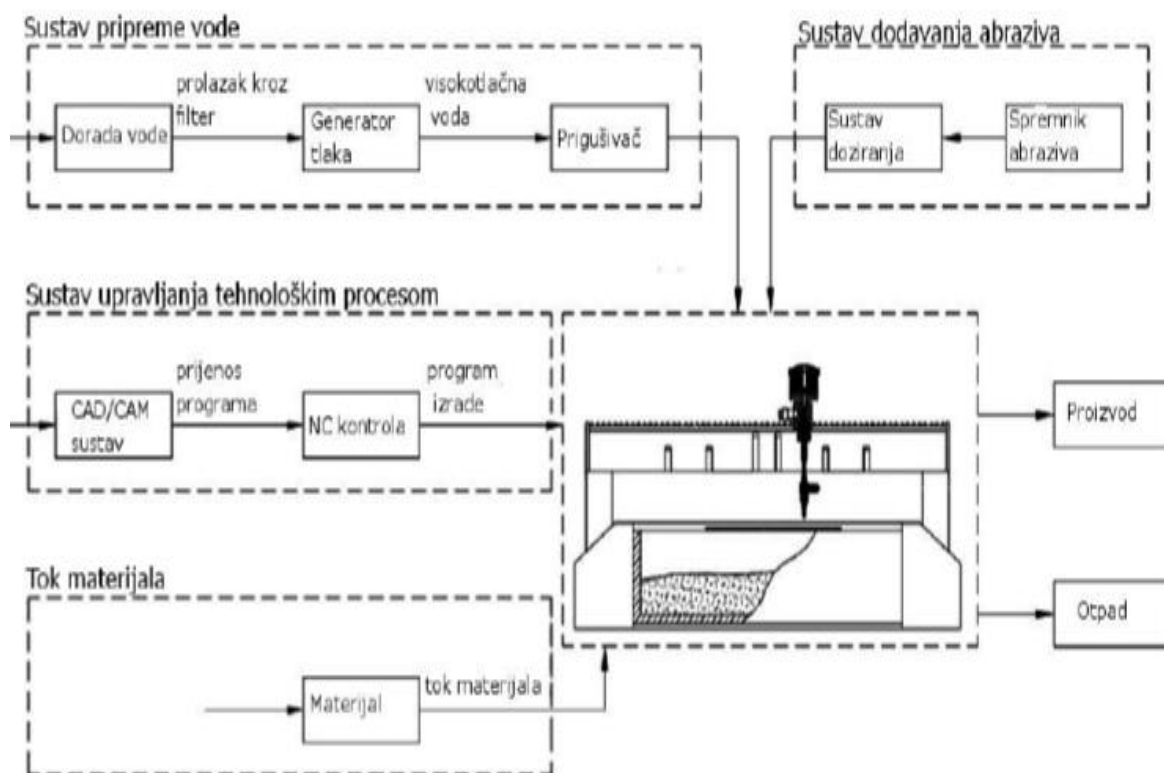
BROJ PROLAZA je faktor koji može pomoći pri ostvarivanju veće dubine rezanja po istoj liniji, a da se pritom koristi niži tlak i veća posmična brzina. Prolaz po istoj liniji rezanja predstavlja problem zbog otpora površine reza budući da dolazi do sušenja i zadržavanja fluida i abraziva iz prethodnog prolaza kao posljedica pogrešnog ispiranja zone rezanja. Takav natopljeni sloj rezne površine sprečava prodiranje abrazivnih čestica i umanjuje učinak rezanja.

#### 4. TEHNOLOGIJA REZANJA MATERIJALA MLAZOM VODE

Tehnologija rezanja materijala abrazivnim vodenim mlazom u svom sustavu sadrži četiri glavna modula koji su bitni za pravilno ostvarenje samog procesa. Sam tehnološki proces izvodi se u proizvodnom prostoru pomoću visokobrzinskog vodno-abrazivnog mlaza te ukoliko dođe do otkazivanja jednog od sljedećih elemenata sustava do procesa obrade neće doći:

1. Generator tlaka kojim se postiže dovoljno visoki tlak
2. Spremnik abraziva za opskrbu rezne glave
3. Računalno upravljanje za usmjeravanje rezne glave
4. Spremnici za hvatanje abraziva i odvojenih čestica te raspršivanje kinetičke energije vodenoga mlaza

Na slici 6 je prikazana tehnologija rezanja materijala sa svoja četiri osnovna modula za ostvarenje procesa



Slika 6. Tehnologija rezanja materijala abrazivnim vodenim mlazom

##### 4.1. Sustav pripreme vode

Veliku pažnju potrebno je usmjeriti na kvalitetu vode koja se dovodi u sustav budući da ona ima velik utjecaj na kvalitetu procesa obrade, ali ima ključnu ulogu u vijeku trajanja komponenti stroja. Visoko-tlačne pumpe, ventili i mlaznice će se potrošiti puno prije ukoliko je kvaliteta vode loša te ako u njoj ima mnogo minerala. Voda mora biti propisno tretirana



jer ako je u potpunosti čista bez minerala u tragovima može dovesti do otapanja dijelova pumpe i mlaznice. Također je bitno održavanje temperature vode oko 20° jer ona pogoduje pravilnom radu i dužem vijeku trajanja pumpe.

#### 4.1.1. Dorada vode

Visoka koncentracija otopljenih tvari uzrokuje ubrzano trošenje dijelova stroja te se iz toga razloga mora provesti analiza kvalitete vode koja se dovodi iz gradske mreže. Za smanjenje udjela otopljenih tvari koriste se postupci deionizacije, omekšavanja vode ili postupak povratne osmoze. Proizvođač prema udjelu otopljenih tvari propisuje kojom metodom će se voda tretirati. Optimalna vrijednost otopljenih tvari je oko 70 mg/l.

Tablica 5. Načini tretiranja vode

Kriterij	Vrijednost	Preporučeni tretman
Ukupna količina otopljenih tvari	Nizak udio ukupno otopljenih tvari (<100 mg/l)	Omekšavanje vode
	Srednji udio ukupno otopljenih tvari (100-200 mg/l)	Omekšavanje vode, deionizacija ili postupak povratne osmoze
	Visok udio ukupno otopljenih tvari (>200 mg/l)	Deionizacija ili postupak povratne osmoze
Udio silicija	Visok udio (>15mg/l)	Dvostruka deionizacija
Vrijednost pH	Vrijednost mora biti između 6-8 pH	

#### 4.1.2. Generator tlaka

Sustav za generiranje visokog tlaka mora osigurati stalani i laminirani protok vode visokog pritiska. Budući da nam je pri obradi vodenim rezanje potreban tlak vode čak i do 4000 bara neophodna je primjena generatora tlaka. U procesu je potrebno održavati volumen i tlak vode bez značajnijih oscilacija u vremenu tako da je njihova kontrola vrlo bitna kako bi ispunili te zahtjeve.

Postoje dvije glavne vrste pumpi koje se koriste za generiranje vode visokog pritiska: pojačivač tlaka (multiplikator) i klipna pumpa.

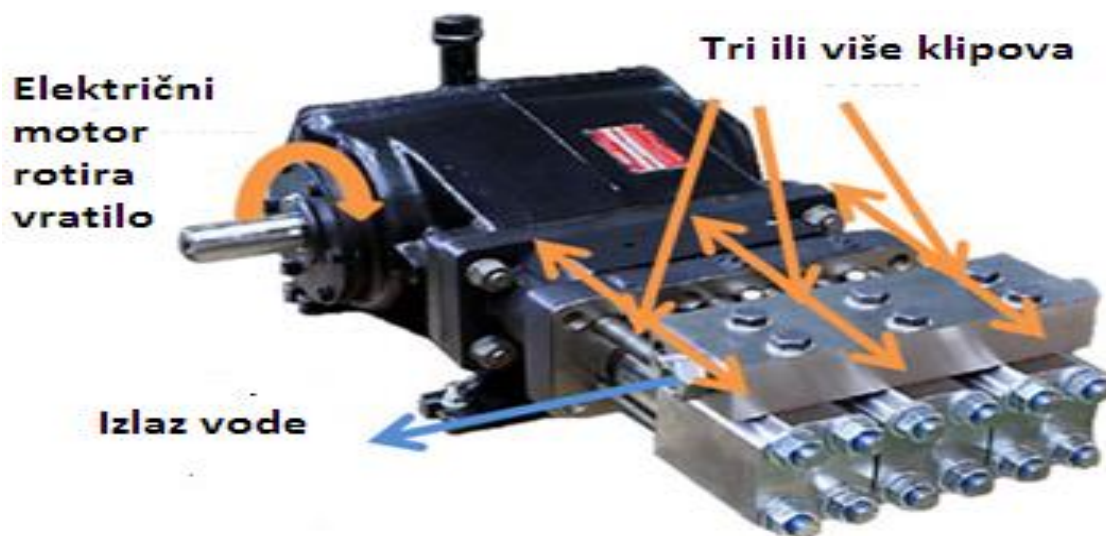
POJAČIVAČ TLAKA kao što i sam naziv kaže koriste princip pojačavanja ili multipliciranja tlaka za generiranje željenog pritiska vode. Ukoliko je potrebno postići tlakove vode iznad 4000 bara koriste se pumpe s jednim ili više pojačivača tlaka. Pojačivač tlaka sastoji se od dva cilindra s različitim unutarnjim promjerima. Ukoliko se primjenjuje pritisak sa jedne

strane klipa, a s druge strane je cilindar iste površine pritisak će biti isti. Smanjenjem površine jednog klipa za pola, na drugom klipu ćemo dobiti dvostruko veći pritisak. Hidrauličko ulje djeluje na veću površinu klipa, a na manjoj površini klipa generira se visokotlačna voda. Omjer ulaznih i izlaznih tlakova ovisi o veličini omjera polumjera klipa i oni se biraju ovisno o potrebi visine tlaka vode. Omjeri polumjera klipova kreću se od 1:10 pa do 1:25. Za pravilan rad pojačivača tlaka zaduženi su servo ventili koji elektro signalima reguliraju smjer dovoda hidrauličkog ulja u cilindar. Na samome kraju pojačivača nalaze se jednosmjerni ventili koji omogućavaju izlazak vode visokog tlaka i ulazak obrađene vode. Jednosmjerni ventil osigurava strujanje vode samo u jednom smjeru. Kako bi se izbjeglo ritmično strujanje vode uzrokovano radom pumpe upotrebljava akumulator tlaka ili prigušivač koji reducira oscilacije tlaka u sustavu.



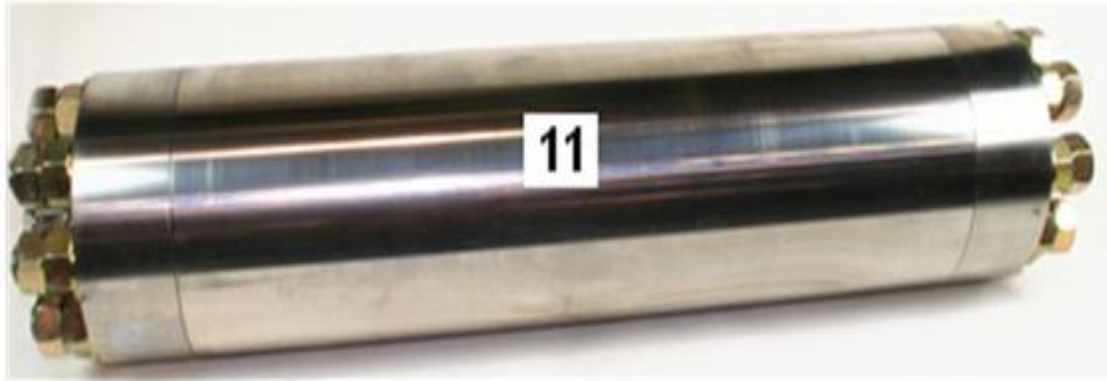
Slika 7. Pojačivač tlaka

KLIPNA PUMPA koristi se pri obradi nižim i srednjim tlakovima do 2700 bar-a te je manje pouzdana za visoke tlakove. Takva pumpa sastoji se od elektromotora koji je izravno spojen na radilicu. Radilica se rotira, a kako je povezana s klipnjačama dolazi do pomicanja klipova. Klipne pumpe uglavnom se sastoje od tri ili više klipova. Klipovi svojim naizmjeničnim pomicanjem osiguravaju konstantan protok i stalan tlak. Ovakve pumpe su prikladne za potrebe čišćenja površine i pripremu površina koje se obrađuju.



Slika 8. Klipna pumpa

AKUMULATOR PRITISKA ili PRIGUŠIVAČ prigušuje velike razlike u tlakovima, tako da su varijacije tlaka u granicama od 2,5 %. Bez akumulatora pritiska dolazi do prekida kompresije kod promjene smjera gibanja klipa te voda struji ritmično i ostavlja tragove prilikom rezanja materijala što je karakteristika loše obrade, a može dovesti i do pucanja cijevi kojima se voda dovodi do rezne glave.



Slika 9. Akumulator pritiska

## 4.2. Sustav dodavanja abraziva

Kako bi se povećala učinkovitost mehaničkog djelovanja mlaza dodaje se abrazivno sredstvo. Abrazivno sredstvo se nalazi u spremnicima koji se razlikuju po svojoj veličini tako da imamo velike spremnike koji su smješteni na podu u blizini stroja i male spremnike koji se montiraju iznad rezne glave. Veliki spremnici mogu sadržavati do 1000 kg abraziva. Ukoliko se rezanje vrši sa jednom reznom glavom troši se oko 6,5 kg abrazivnog sredstva po minuti. Spremnik od 500 kg abrazivnog sredstva dostatan je za oko 13 sati rada što je dovoljno za rad skoro dvije smjene prije nego što se mora ponovno napuniti. Mali spremnici koji su montirani iznad rezne glave izvedeni su tako da se dovod abraziva vrši gravitacijski do rezne glave. Količina abraziva je regulirana postavljanjem blendi različitog promjera. Danas je omogućeno i CNC upravljanje količine abrazivnog sredstva puštenog iz malog spremnika. Time je moguća optimalna potrošnja abraziva ovisno o načinu obrade.



Slika 10. Veliki spremnik abraziva (lijevo) i mali spremnik abraziva (desno)

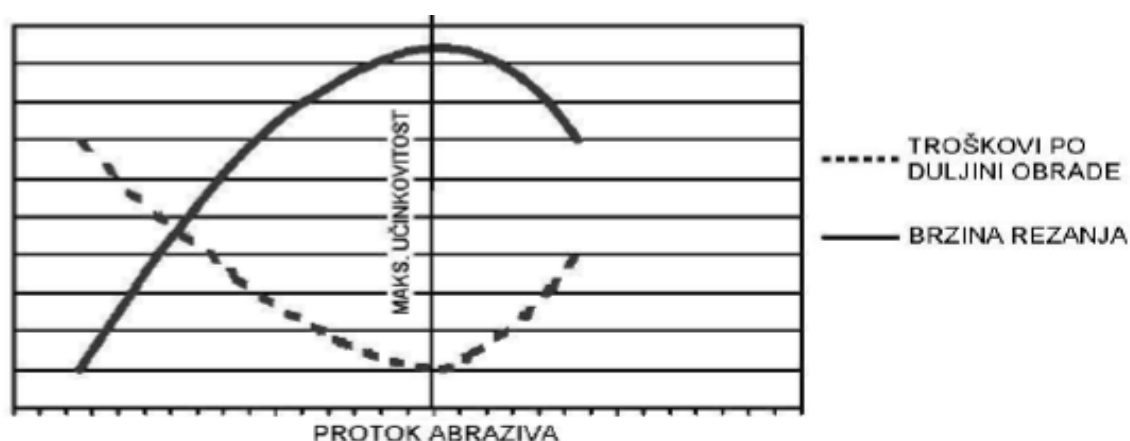
Abrazivno sredstvo mora zadovoljiti odgovarajuće tehnološke zahtjeve kao što su: visoka otpornost na trošenje i raslojavanje, visoka tvrdoća, izometrička i kemijska otpornost. Abrazivno sredstvo koje zadovoljava tehnološkim zahtjevima ne utječe u velikoj mjeri na točnost obrade već ima veliku ulogu u postizanju kvalitete obrađene površine, učinku skidanja materijala, cijeni i utjecaju na okoliš. Kao abrazivno sredstvo u obradi abrazivnim mlazom upotrebljavaju se mineralna sredstva granat (garnet) i korund te kvarcni pijesak. Najčešće upotrebljavan abraziv je granat jer je iznimno tvrd, težak i ekonomski najisplativiji. Granulacija abraziva je različita, a ovisi o vrsti primjene. Granulacija označena sa 120 upotrebljava se tamo gdje je potrebno dobiti najbolju kvalitetu obrađene površine pri malim brzinama rezanja. Najčešće je u upotrebi granulacija 80 pri kojoj su moguće veće brzine, ali je lošija kvaliteta obrađene površine. Granulacija 50 se koristi za potrebe gdje je materijal deblji te su brzine rezanja najveće, ali će površina biti grublje obrađena od granulacije 80.



Slika 11. Vrste abraziva

Optimizacija količine pijeska potrebnog za obradu je bitna jer utječe na vrijeme obrade, a time se povećavaju troškovi obrade. Ukoliko je protok pijeska preveliki, mlaz vode ga ne stigne ubrzati, pa se time smanjuje brzina rezanja što će izazvati neefikasno rezanje. Ako je protok pijeska premali, brzina rezanja će također biti smanjena. U oba slučaja dolazi do smanjenja brzine rezanja, što za posljedicu produžuje vrijeme obrade i time povećava troškove obrade.

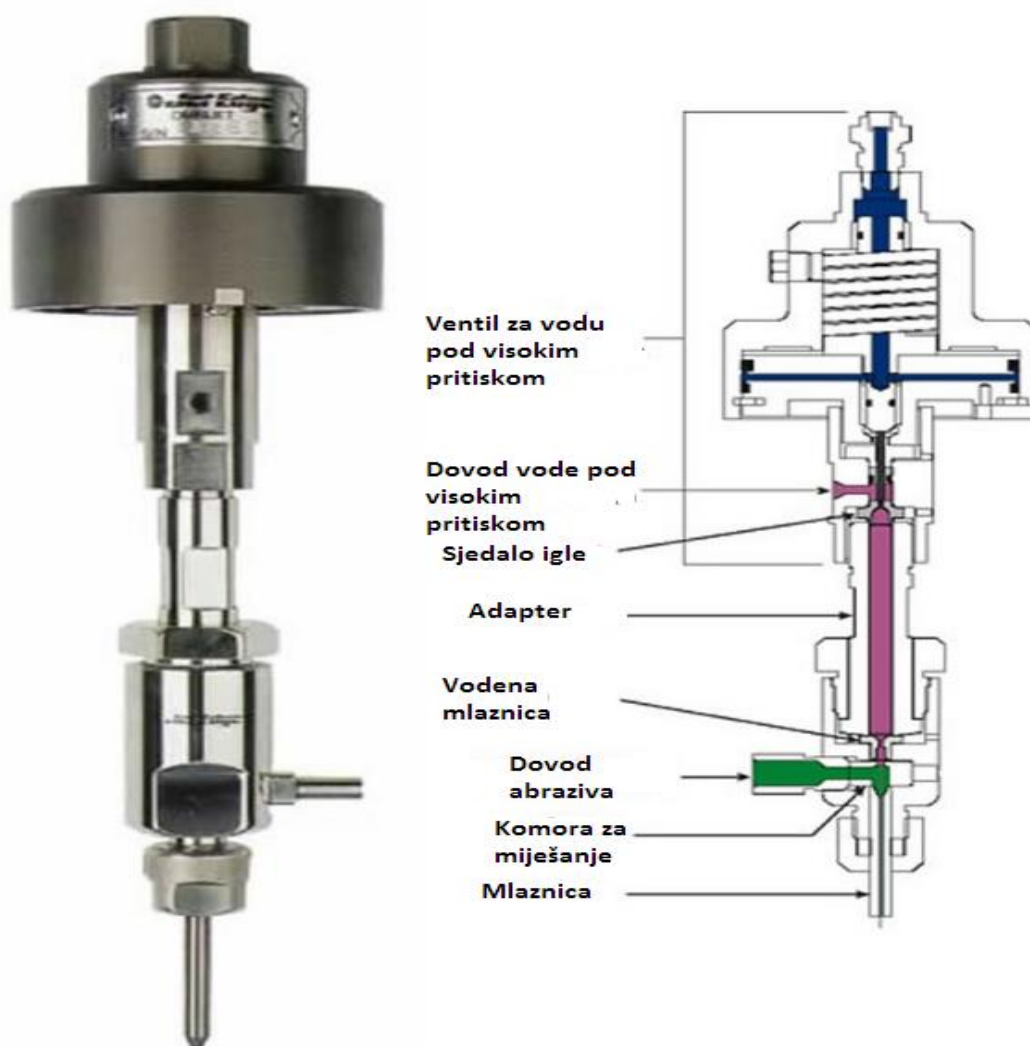
Slikom 12. prikazan je optimalan protok abraziva. Kako bi održali ekonomičnost obrade potrebno je kontrolirati i održavati parametre obrade na optimalnoj razini, jer oni utječu i na kvalitetu obrade. Vidljivo je da troškovi obrade rastu ukoliko se ne držimo optimalne razine potrošnje abraziva.



Slika 12. Optimalan protok abraziva

### 4.3. Rezna glava za obradu vodenim abrazivnim mlazom

Rezna glava je dio pribora korišten u tehnologiji rezanja materijala mlazom vode. Rezna glava je zadnji dio u sustavu WJ / AWJ tehnologiji, pomoću koje se dovodi voda pod visokim tlakom i abrazivne čestice u svrhu kreiranja alata za rezanje materijala. Konstrukcija i montaža unutarnjih dijelova rezne glave važni su za učinkovitost procesa rezanja. Rezna glava je predmet kontinuiranog razvoja, a istraživanje je kompleksno s obzirom na turbulencije i poteškoće u procesu miješanja vode i abraziva.



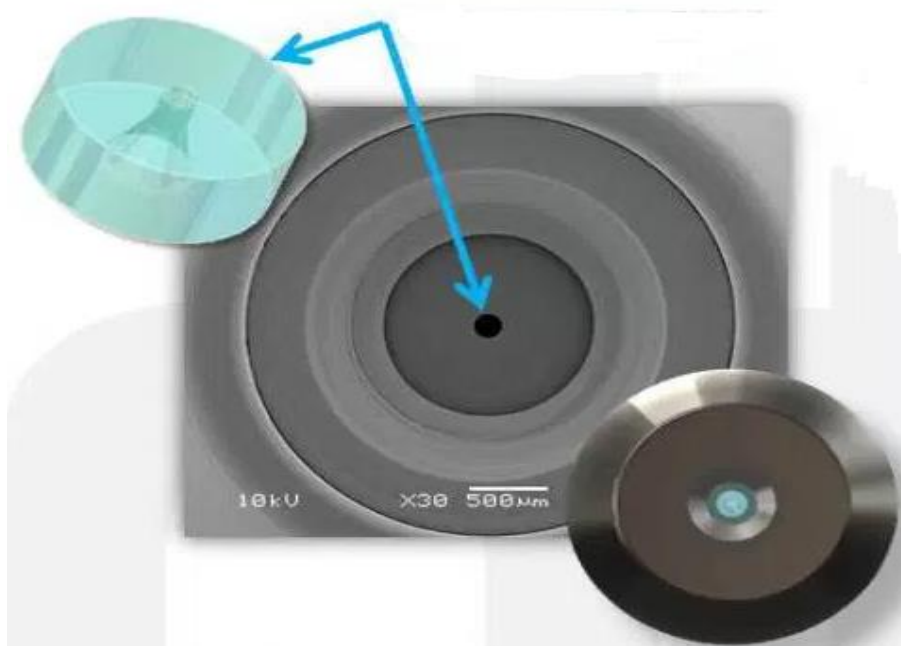
Slika 13. Izgled abrazivne rezne glave

Prilikom kretanja sa obradom, pneumatski ventil podiže iglu sa njenog sjedišta i otvara protok visokotlačnoj vodi. Visokotlačna voda ulaskom u reznju glavu ide prema mlaznici gdje se brzina vode povećava, a zatim se miješa s abrazivom u komori za miješanje. Mješavina abrazivnog sredstva i vode doći će do abrazivne mlaznice gdje se vrši dodatno miješanje, ali i fokusiranje mlaza na obradak. Granule abraziva se u mlaznici sudaraju i lome što će dovesti do pada kinetičke energije te dovesti do smanjenja brzine. Usisavanjem zraka u komoru za miješanje povećat će se brzina abrazivnih čestica i odvojiti abraziv od stjenke cijevi. Time se postiže maksimalna brzina abrazivnih čestica u osi mlaza.



#### 4.3.1. Vodena mlaznica

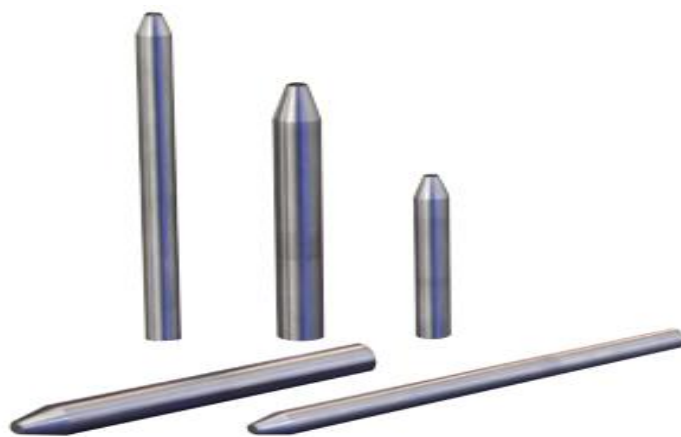
Vodne mlaznice izrađuju se od rubina, safira ili dijamanta. Safirne i rubinske sličnih su karakteristika te im je kraći vijek trajanja od dijamantnih sapnica koje ih danas zamjenjuju. Dijamantne sapnice su i do 10 puta trajnije, a moguće ih je više puta očistiti i stvaraju koherentan mlaz. Nečistoće u dijamantnim sapnicama se ultrazvučno čiste. Kakvoća vode vode može utjecati na njihov vijek trajanja pa je potrebno tretiranje vode kako bi se izbjegle pukotine na mlaznici i nečistoće koje mogu prouzročiti neispravan vodeni mlaz. Dijamante mlaznice su čak i do 10 puta skuplje pa će biti prikladnije za obrade kod kojih se ne mijenjaju parametri rezne glave. te kod rada stroja u tri smjene. Pravilno održavane mlaznice dat će koherentan mlaz na izlazu iz cijevi za fokusiranje, a samim time bit će bolja kvaliteta obrade.



Slika 14. Dijamantna vodena mlaznica

#### 4.3.2. Abrazivna mlaznica

Uloga abrazivne mlaznice je da ubrza čestice abraziva, ali i da fokusira izlazni mlaz prema materijalu koji se obrađuje. Važna značajka abrazivne mlaznice je njena dužina, jer u kombinaciji s geometrijom mlaznice značajno određuje brzinu i fokus mlaza. Zbog trenja na unutrašnjoj stijenci cijevi za fokusiranje, koje rezultira nižom brzinom protoka. Preporuča se korištenje kraćih cijevi za fokusiranje što daju kontinuiran mlaz. Mlaz stvoren prolaskom kroz vodenu mlaznicu je ojačan abrazivnim sredstvom u komori za miješanje, koja se nalazi ispred abrazivne mlaznice. Zbog manje brzine abrazivnih čestica i vrlo oštrog abraziva uz samu komoru za miješanje tamo najčešće dolazi do trošenja abrazivne mlaznice. Abrazivna mlaznica obično se mijenja kada se unutarnji promjer poveća uslijed trošenja za 0,25 mm.



Slika 15. Karbidne abrazivne mlaznice različitih duljina

Tablica 6. Vrste i karakteristike abrazivnih mlaznica

Vrste abrazivne mlaznice	Radni vijek (radnih sati)	Karakteristike
Standardna wolfram karbidna mlaznica	4-6	Nisu više u upotrebi zbog lošeg omjera karakteristika i cijene po radnom satu
Jeftina kopozitno karbidna mlaznica	35-60	Pogodna za grubu obradu ili učenje novog operatera
Srednje dugotrajna kompozitno karbidna mlaznica	80-90	Jako dobra i univerzalna mlaznica
Premium kompozitno karbidna mlaznica	100-150	Mlaznica najbolje kvalitete. Trošenje ove mlaznice je koncentrično i predvidljivo. Koristi se kod preciznih obrada



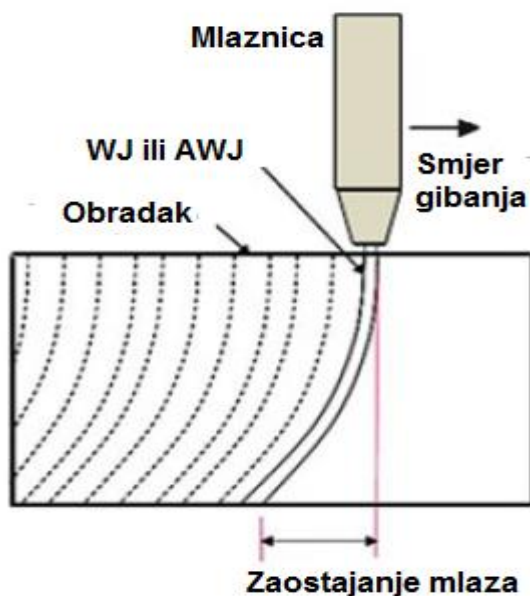
## 5. GREŠKE NASTALE PRILIKOM OBRADE VODENIM MLAZOM

Kako bi ostvarili zahtjevanu kvalitetu rezanjem vodenim mlazom potrebno je pravilno odrediti parametre obrade, ali je bitan i pravilan rad stroja i njegovih komponenti. Tolerancije koje se mogu postići ovakvim strojevima su  $+0,025$  mm do  $-0,025$  mm. Realnije je područje tolerancija  $+0,05$  mm do  $-0,05$  mm. Ostvarivanje tolerancija ponajprije ovisi o karakteristikama stroja. Pozicioniranje rezne glave stroja uvelike doprinosi toleranciji ostvarivoj prilikom obrade. Stroj koji može pozicionirati reznju glavu unutar  $0,025$  mm ostvaruje točnost obrade od  $0,12$  mm.

Greške koje se mogu pojaviti prilikom obrade vodenim mlazom:

### 1. ZAOSTAJANJE MLAZA VODE

Ovaj problem nastaje zbog smanjenja kinetičke energije, te dolazi do zaostajanja mlaza. Prilikom rezanja dolazi do interakcije mlaza i materijala obrade. Mlaz u izlaznoj fazi rezanja materijala zaostaje za točkom s gornje strane ulazne faze rezanja materijala. Takav zaostali mlaz ne predstavlja problem prilikom obrade linija već kod izrade radijusa jer rezna površina poprima stožasti oblik ako se obrađuje većom brzinom. Kako bi se umanjio utjecaj zaostajanja mlaza potrebno je smanjiti posmičnu brzinu vodenoga mlaza.

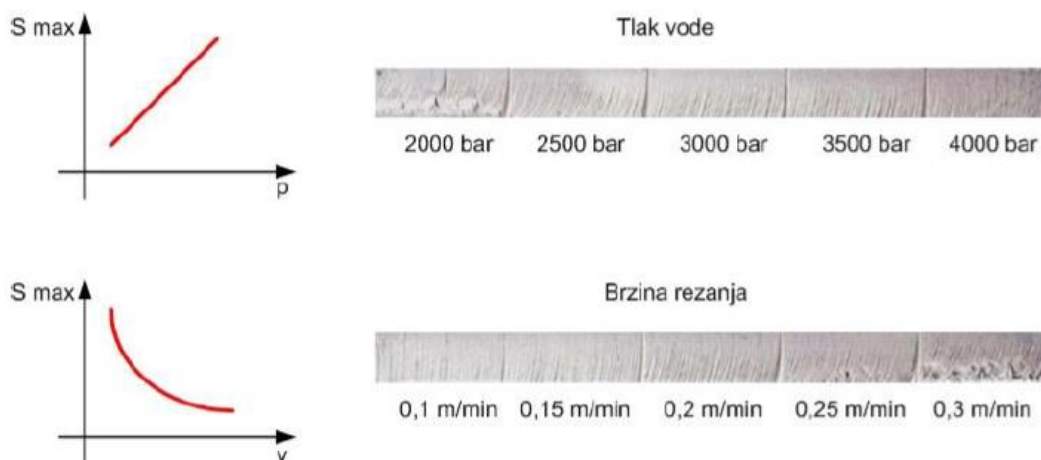


Slika 16. Zaostajanje mlaza

### 2. FORMIRANJE BRAZDI

Brazde su karakteristična pojava nastala prilikom obrade materijala abrazivnim vodenim mlazom, ali se također javljaju i kod drugih tehnologija koje se obrađuju usmjerenim snopom poput rezanja plazmom i laserom. Takva grublja izbrazdana površina nastaje s

porastom posmične brzine, a može se ublažiti smanjenjem brzine rezanja ili podizanjem tlaka. Na slici 17 je prikazan utjecaj brzine i tlaka na izbrazdanost površine reza.



Slika 17. Utjecaj brzine i tlaka na stvaranje brazdi

Što je duže vrijeme zadržavanja rezne glave na određenom mjestu to je dublji rez, jer abrazivne čestice imaju dovoljno vremena skinuti sloj materijala. Takvi uvjeti obrade rezultirat će boljom mikrostrukturom površine. Na slici 18 su prikazane brazde koje su nastale pri različitim posmičnim brzinama tako da je pod broj 1 najveća brzina posmična brzina pa je obrađena površina najgrublja i ima izražene brazde, pod brojem 2 i 3 prikazane su površine obrađene pri nižim posmičnim brzinama što je dovelo do manje izbrazdanosti površine te je površina finije obrađena.



Slika 18. Utjecaj brzine obrade na izbrazdanost površine reza

### 3. STOŽASTI REZ

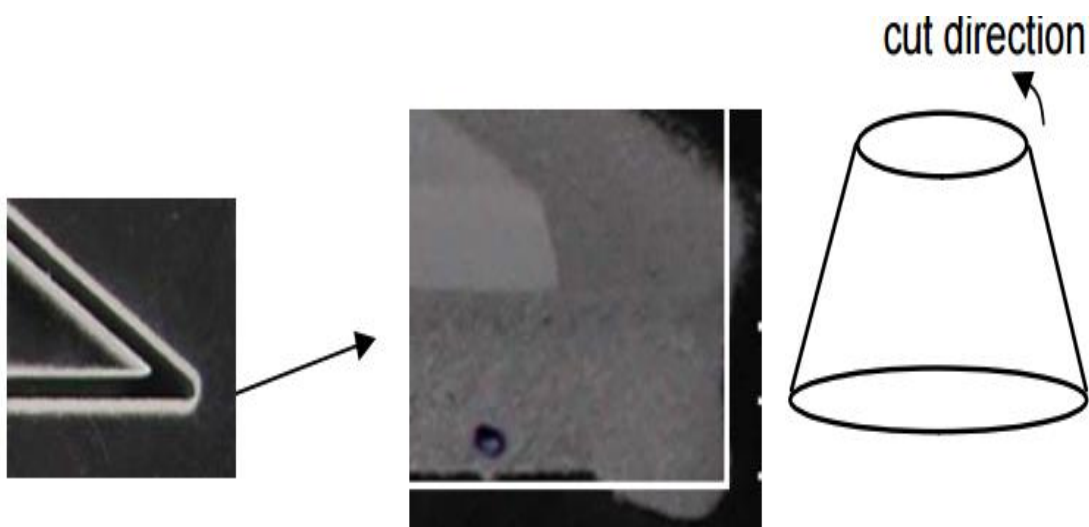
Stožasti rez ili „V“ konusni oblik nastaje prilikom rezanja debljih materijala velikom posmičnom brzinom.



Slika 19. Stožasti rez

### 4. POGREŠKE UNUTARNJEG KUTA

Ove greške nastaju kad je potrebno odrezati materijal koji sadrži uglove. Ukoliko se rezanje vrši pri velikoj brzini može doći do ukopavanja mlaza u materijal kao što je vidljivo sa slike.



Slika 20. Pogreške unutarnjeg kuta

## 6. OBRADA LASEROM

Obrada laserom (Laser Beam Machining) zauzima značajno mjesto u suvremenoj tehnologiji strojogradnje. Laser je akronim od engleskih riječi „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, koji u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Laser je izvor intenzivne svjetlosti određene valne duljine. Svjetlosne zrake se gibaju paralelno i tako se prenose na dužim putanjama, a mogu se fokusirati u jednu malu točku u kojoj se tako stvara ekstremno visoka temperatura. Laser je najsuvremeniji izvor toplinske energije koji se koristi u obradi odvajanjem. Glavno svojstvo ovakve svjetlosti je mogućnost fokusiranja na točku malog promjera ( $< 1\text{mm}$ ), što je nemoguće kod prirodne svjetlosti.

Već 1917. godine Albert Einstein je opisao teorijske osnove stimulirane emisije svjetlosti. Tek 1960. godine je Theodor H. Maiman izradio prvi laser s čvrstim aktivnim medijem (laser s rubinom). Od 1980. laser se uvodi u industriju kod rezanja lima. Danas je primjena lasera sastavni dio suvremene tehnike u područjima telekomunikacija, medicinske tehnike, mjerne tehnike, tehnologije obrade reznih materijala (metala, keramike, tekstila i drugih materijala).

Obrada materijala laserskim zrakama danas obuhvaća veći broj postupaka koji se koriste u više industrijskih grana kao što su: rezanje, bušenje, zavarivanje, graviranje, poboljšanje svojstva površine (otvrdnjavanje), mikro obrada i druge.

Lasери se razlikuju prema vrsti aktivnog medija koji služi za pojačavanje svjetlosti tako da ima više vrsta lasera i to: laser s čvrstim medijem, laser s plinskim medijem, laser s poluvodičem (diodni laser). Za zavarivanje i rezanje se upotrebljavaju  $\text{CO}_2$  i Nd:YAG laseri. Karakteristika svakog lasera je valna duljina emitirane svjetlosti- $\lambda$ , koja je funkcija razlike energetskih stanja atoma/molekula aktivnog medija.

Prednost ove tehnologije je: visoka fleksibilnost, visoke kvalitete reza, velike brzine rezanja, male deformacije materijala, uske zone utjecaja topline, visoka gustoća snage odnosno malog unosa topline.

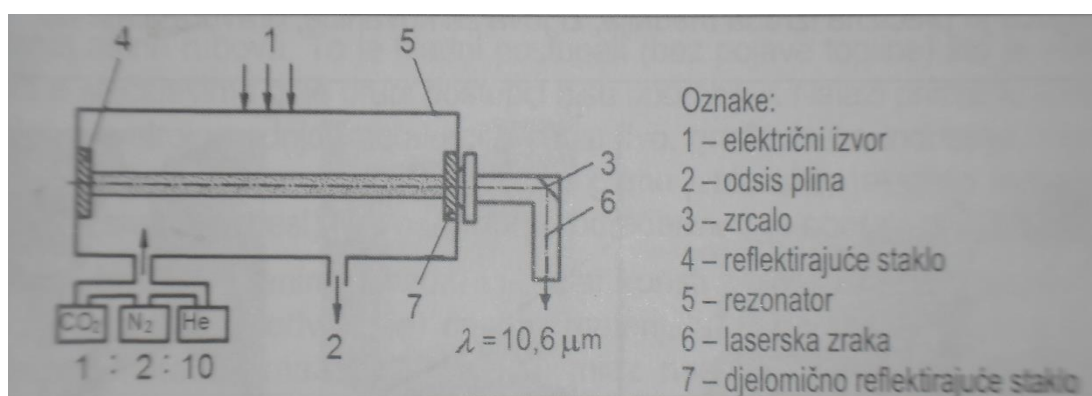
Nedostatak ove tehnologije su visoki investicijski troškovi koji se mogu nadoknaditi velikom brzinom rezanja i nepotrebnom naknadnom obradom radnog komada te visokom kvalitetom reza.

### 6.1. Vrste lasera

Lasери se razlikuju prema vrsti aktivnog materijala u kojem se događa pojačanje svjetlosti. Za rezanje materijala većinom se primjenjuju  $\text{CO}_2$  i Nd:YAG laseri, koji su dobili ime prema vrsti aktivnog medija. Laser s plinovitim medijem,  $\text{CO}_2$  laser ima za aktivni materijal mješavinu plinova  $\text{N}_2$ , He,  $\text{CO}_2$ . Takav laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ( $\lambda=10600\text{ nm}$ ) i snage je do 50 kW. Nd:YAG laser ima kruti aktivni medij koji je prema sastavu kristal granat, u ovom slučaju „Ytrij-Aluminij-Granat“ obložen s Neodimijem (Nd). Neodimij je aktivni materijal. Nd: YAG laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ( $\lambda=1064\text{ nm}$ ). Takva vrsta lasera primjenjuje se za označavanje, zavarivanje i rezanje elektroničkih komponenti.

### 6.1.1. CO<sub>2</sub> laser

CO<sub>2</sub> laseri emitiraju svjetlost valne duljine 10,6 μm te imaju ukupnu efikasnost od otprilike 10-13%. Za stvaranje laserske zrake CO<sub>2</sub> laseri koriste mješavinu plinova. Mješavina tih plinova sastoji se od CO<sub>2</sub> – N<sub>2</sub> – He ( omjer 1:2:10). Aktivni medij lasera, plin CO<sub>2</sub> je stimuliran električnim pražnjenjem. Tijekom tog procesa, prvo se molekule N<sub>2</sub> ubrzavaju koje sudaranjem s CO<sub>2</sub> molekulama predaju njima svoju energiju. Tako se energija CO<sub>2</sub> molekula podigne na višu energetska razinu. Sudaranjem molekula CO<sub>2</sub> s atomima helija, koji čine većinski dio plinske smjese, molekule CO<sub>2</sub> se vraćaju u svoje početno energetska stanje i spremne su za ponovni ciklus. Da bi se ti procesi mogli odvijati potreban je tlak 100-250 hPa. Plin se hladi cirkulacijom kroz rashladni uređaj. Budući da se plin pri električnom pražnjenju vremenom potpuno raspada, on se mora nadopunjavati svježom plinskom smjesom.



Slika 21. Shema i princip rada CO<sub>2</sub> lasera [9]

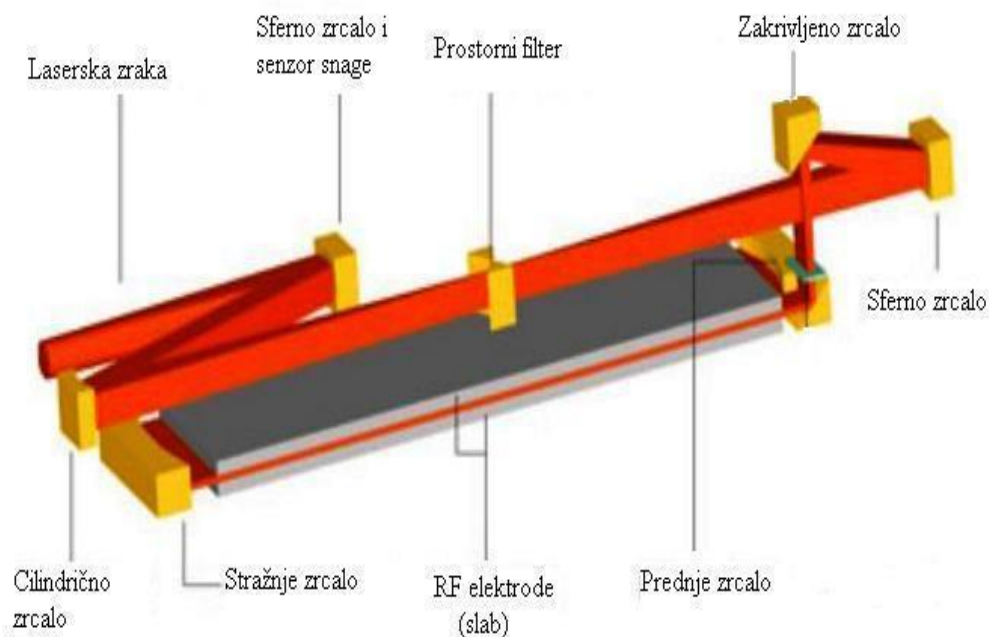
#### 6.1.1.1 Difuzno hlađeni CO<sub>2</sub> laseri

Unesena energija potrebna za rad lasera je vrlo velika, a samo mali dio te energije se iskoristi za lasersku zraku (10-15%) dok se preostali dio gubi na toplinu. Zbog toga je potrebno hlađenje. Kod prvih CO<sub>2</sub> lasera, mješavina laserskog plina, zapečaćena unutar cijevi za pražnjenje, bila je hlađena isključivo kondukcijom topline. Unatoč učinkovitom hlađenju vanjskog zida cijevi od kvarcnog stakla, zraka je mogla postići snagu od oko 50 W po metru cijevi. Takav koncept nije dopustio konstrukciju lasera velike snage.

#### 6.1.1.2. CO<sub>2</sub> Slab laser

CO<sub>2</sub> laseri dostupni u rasponu snage između 1 i 6 kW, a opremljeni su bakrenim elektrodama velikih površina. Između elektroda odvija se frekvencijom pobuđeno plinsko pražnjenje. Malim razmakom između elektroda omogućeno je učinkovito uklanjanje topline iz tlačne komore, pa se time povećava snaga lasera. Difuzijom grijanih molekula na hlađene ploče elektroda postiže se prijenos topline. Nestabilni rezonator sastoji se od rotirajućih paraboličnih zrcala, čime je omogućeno odvajanje fotona od laserske zrake. Vodom hlađene komponente koriste se kako bi se izvorna pravokutna zraka pretvorila u okruglu simetričnu zraku s kvalitetom od  $K \geq 0,9$ . Prednosti ovih lasera su: visoka kvaliteta

zrake, nije potrebno hlađenje plina, niska potrošnja plina, jednostavno održavanje, nema protoka plina i kontaminacije optike rezonatora.



Slika 22. Princip rada slab lasera [8]

#### 6.1.1.3. Zatvoreni CO<sub>2</sub> laser

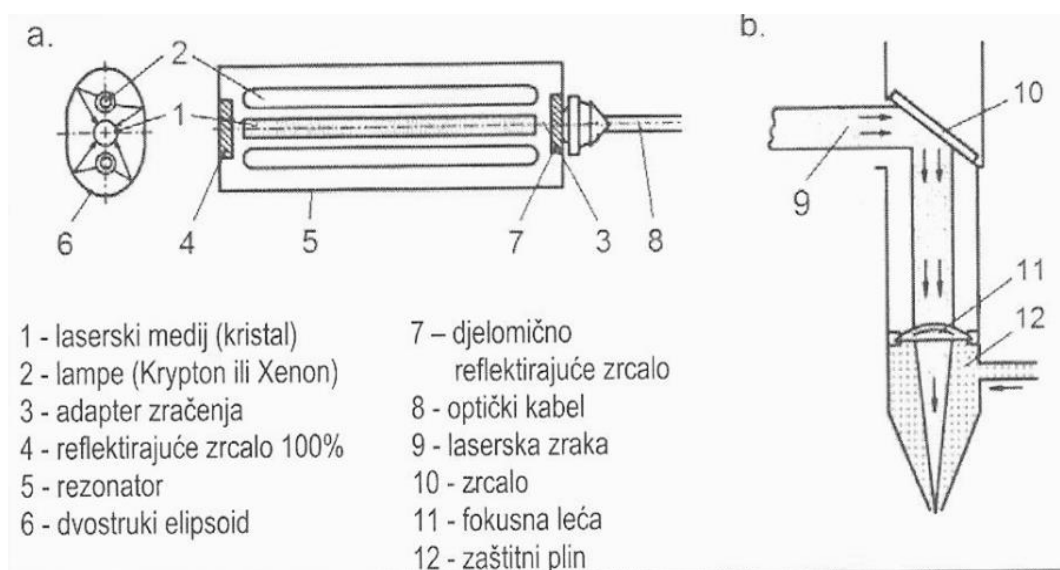
Princip rada zatvorenog CO<sub>2</sub> lasera je sličan kao i kod slab lasera. Takvi laseri ne zahtijevaju dovod vanjskog plina i vrlo su pouzdani. Ovi laseri su dostupni s izlaznom snagom od 600 W i obično se koriste kod rezanja nemetala (papir, staklo, plastika), metala, izrade prototipova i graviranja.



Slika 23. Zatvoreni CO<sub>2</sub> laser tvrtke Rofin

### 6.1.2. Laser s krutim medijem (Nd:YAG)

U plinskim laserima aktivni medij se sastoji od atoma, iona i molekula u plinovitom stanju ( $\text{CO}_2$  laser). Laseri s krutim medijem koriste aktivni medij u obliku kristala tj. kristal Ytrij-Aluminij-Granat obložen s Neodimijem (Nd). Atomi u takvoj jezgri su gušći, te time manje pokretljivi nego u plinovitom stanju. Ytrij-Aluminij –Granat (YAG) kristal ima važnu ulogu u strojnoj obradi. Ioni neodimij ( $\text{Nd}^{3+}$ ) ili iterbij ( $\text{Yb}^{3+}$ ) mogu biti umetnuti u međuprostore u kristalnoj strukturi. Ti ioni predstavljaju aktivni medij. Kombinacijom odgovarajućeg iona s kristalnom rešetkom dobiva se Nd: YAG laser ili Yb:YAG laser. Vanjska energija dovodi se na Krypton-Xenon lampe koje bljeskaju i čija se svjetlost odbija od duplog elipsoida i dolazi na kristal. Bljeskajuća svjetlost uzbuđuje Nd-ione koji emitiraju lasersko zračenje koje reflektira između dva zrcala (100% reflektirajućeg zrcala i djelomično reflektirajućeg) i tako se pojačava i izlazi desno kroz optički kabel do mjesta obrade.



Slika 24. Princip rada lasera s čvrstim medijem Nd:YAG [9]

Postoje i drugi laserski aktivni kristali kao vanadati koji imaju puno manji učinak na obradu. Većina lasera koristi neodimij kao aktivnu tvar. U budućnosti se očekuje da će iterbij dobiti veći značaj u industrijskoj obradi osobito uzimajući u obzir uvođenje „disc lasera“. Laseri čvrstog stanja emitiraju svjetlost valnih duljina 1064 nm odnosno 1030 nm koje su blizu infracrvenog spektra. Prednost lasera čvrstog stanja su izrazito fleksibilna optička vlakna koja se koriste za dovođenje laserske zrake do predmeta obrade. Mnoge materijale, osobito metale, karakterizira povećana apsorpcija valnih duljina blizu infracrvenog spektra, najmanje 10,6  $\mu\text{m}$ . Različite tehnologije i oblici se upotrebljavaju za stvaranje laserske zrake s krutom tvari.



#### 6.1.2.1. Štapni laseri

Štapni laser je najčešće korišteni tip lasera s krutim medijem. Nd:YAG laseri nazivaju se još i štapni laseri budući da je aktivna tvar kristal okruglog štapnog oblika. Promjer kristala je 2 do 8 mm i duljine 20 do 200 mm. Izlazna snaga takvih laserskih kristala može biti između 1 i 1000 W. Završetak tog materijala je uvijek visoko poliran monokristal koji osigurava optimalna optička svojstva.



Slika 25. Kristal okruglog štapnog oblika

#### 6.1.2.2. Impulsni laseri

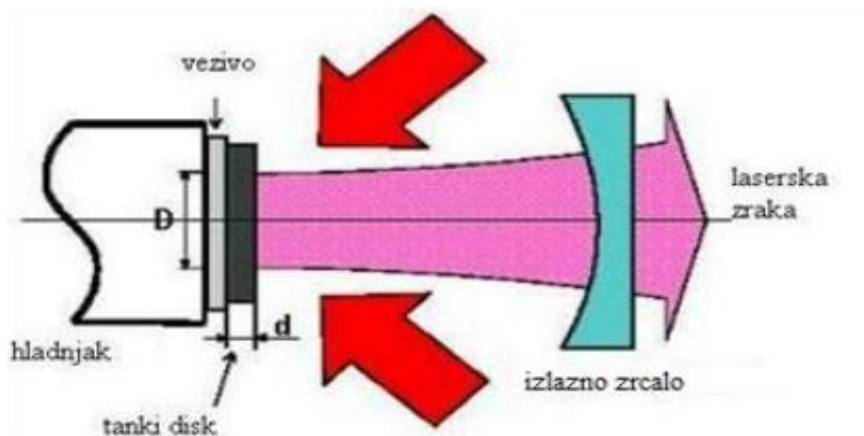
Optička pobuda kod impulsnih lasera postiže se svjetlosnim impulsom iz bljeskalice kojim se pobuđuje aktivna sredina lasera čvrstog stanja. U industriji se najčešće koriste impulsni Nd:YAG laseri s prosječnom snagom zrake manjom od 100 W. Oni mogu raditi s izlaznom snagom od oko 500 W i s najvišom impulsnom snagom većom od 20 kW. To ih čini pogodnima za rezanje debljih ili visoko reflektirajućih materijala.

#### 6.1.3. Disk laser

Disk laser je vrsta laserske tehnologije za lasere čvrstog stanja koji za pobudu koriste diode. Ovakav princip omogućuje izradu lasera visoke izlazne snage pri kojoj je omogućena dobra učinkovitost. Optička izobličenja laserske zrake su zanemariva zbog površinskog hlađenja diska i stoga je rad na laseru tankog diska moguć pri ekstremno velikoj izlaznoj snazi.

Disk laser sadrži laserski kristal koji je oblikovan poput diska s promjerom od nekoliko mm. Promjer ovisi o izlaznoj energiji i debljini od 100 do 200  $\mu\text{m}$ . Dimenzija diska, ovisi o laserskom aktivnom materijalu, količina doziranja i dizajnu pumpe. Materijal tankog diska je itrij – aluminij – granat (YAG) i središnji aktivni dio diska može biti doziran s iterbijevim ionima



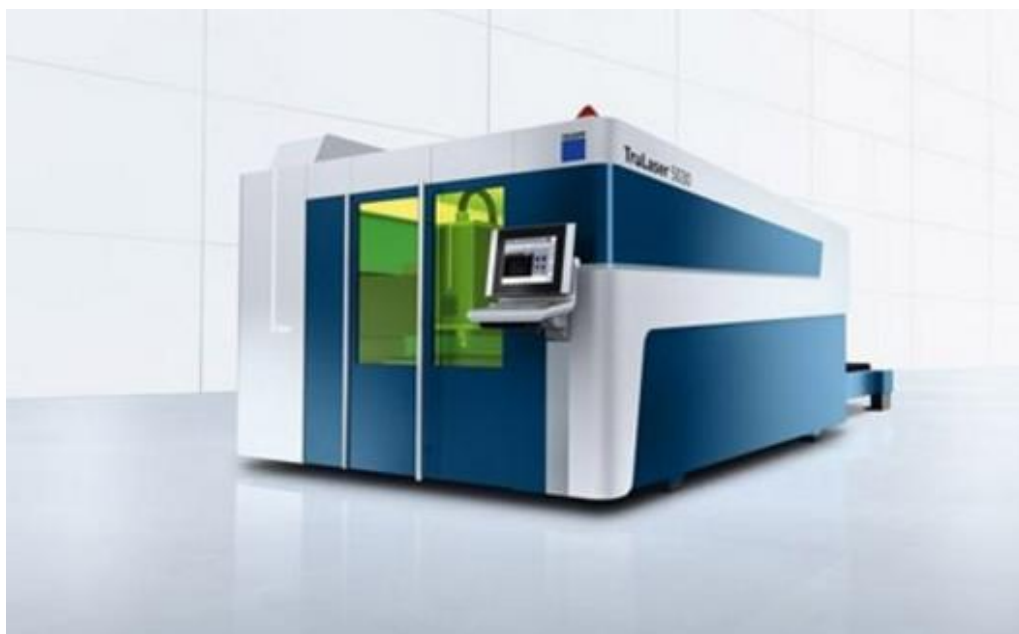


Slika 26. Disk laser [8]

Rasipanje topline varira ovisno o debljini diska pa mora biti korišten najtanji mogući disk koji je u skladu s geometrijom pumpe kako bi se povećao izlazni intenzitet. U kombinaciji s geometrijom pumpe koja omogućava višestruke prolaze svjetlosti osigurava se učinkovita apsorpcija snage pumpe. Iz tog razloga, dozirani iterbij – YAG (Yb:YAG), koji emitira laserske zrake s valno duljinom od 1070 nm, trenutno je preferirani materijal za izradu diska zbog mogućnosti visoke apsorpcije (od 940 nm) svjetlosti. Yb: Yag diskovi mogu biti mnogo tanji od Nd : YAG diskova. Stražnja strana diska je obložena visoko reflektivnim slojem i djeluje kao zrcalo u rezonatoru; prednja strana je obložena s antirefektivnim slojem za obje valne duljine. Disk je montiran tako da je stražnjom stranom okrenut na rashladni uređaj, koristeći spoj zlato – kositar kao vezivo, što omogućuje vrlo jako pričvršćivanje diska na rashladnom uređaju bez ikakve deformacije. Disk laseri su idealni za zavarivanje i rezanje metala gdje je potrebna visoka kvaliteta i velika snaga laserskog uređaja i laserske zrake. Najčešće se koriste u automobilske i zrakoplovnoj industriji.

#### 6.1.4. Fiber laseri visoke snage

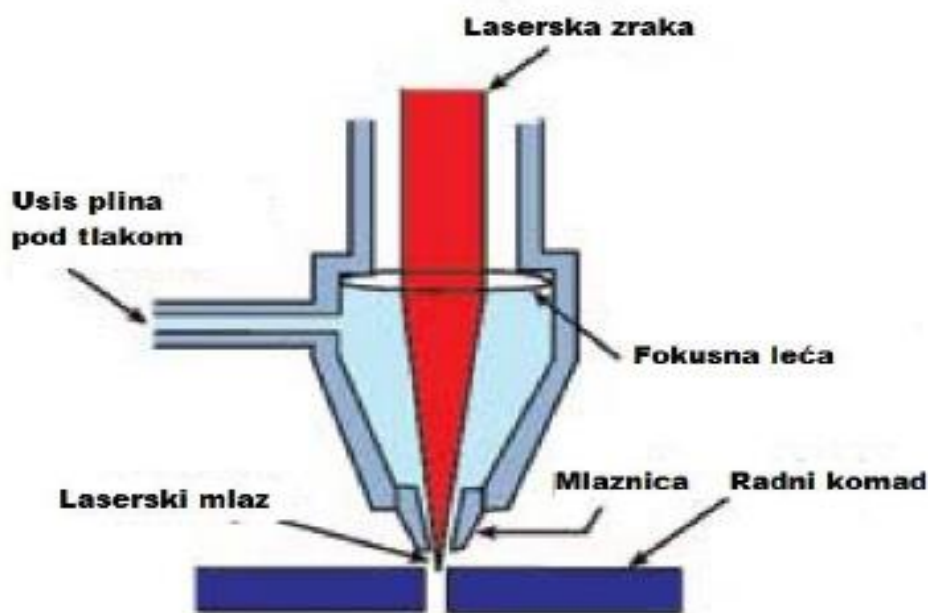
Sastoje se od aktivnih optičkih vlakana i poluvodičkih dioda. Fiber laseri kao izvor svjetlosti za stvaranje aktivnih vlakana koriste jednostruko emitirajuće poluvodičke diode. Emitirana laserska zraka je sadržana u optičkim vlaknima i putuje kroz izoliran fleksibilan kabel. Aktivna vlakna su specijalna optička vlakna obogaćena rijetkim zemljanima ionima što im omogućuje stvaranje ekstremno britke svjetlosti iz male jezgre. Iz tog razloga fiber laseri su u mogućnosti stvoriti veliku izlaznu snagu i kvalitetnu zraku. Mnoge prednosti fiber lasera pred ostalom laserskom tehnologijom poput: kompaktne veličine, dugovječni rad diode, jednostavno održavanje, veliko iskorištenje električne energije i kvalitetna laserska zraka ukazuju da je njime ostvarena ekonomičnost i kvaliteta pri preciznom rezanju što je nekada bilo teško zamislivo. Fiber lasere odlikuje njihova veličina koja omogućuje zauzimanje radnog prostora jer su manji i lakši od tradicionalnih lasera. Kod ostalih lasera je česti problem osjetljivost zbog preciznog poravnanja zrcala, dok su fiber laseri čvršći i manje osjetljivi na radne uvjete u kojima se koriste.



Slika 27. TRUMPF TruLaser 5030 fiber laser

## 7. REZANJE LASEROM

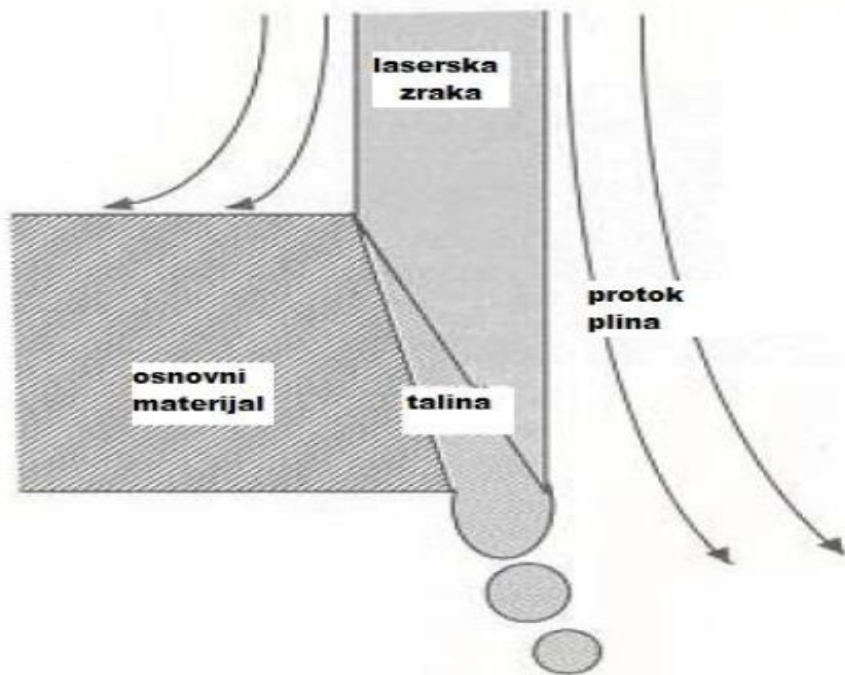
Rezanje laserom je toplinski proces, pri kojem rez nastaje fokusiranjem i zagrijavanjem materijala putem laserske zrake snage od oko  $10^4 \text{ Wmm}^{-2}$ . Mlaz aktivnog ili inertnog plina pod tlakom u ovoj obradi zadužen je da pod tlakom otpuhuje rastaljeni materijal nastao fokusiranjem laserske zrake koja tali materijal. Rezanje laserom prema mehanizmu rezanja može se podijeliti na: lasersko rezanje taljenjem (rezanja inertnim plinom), lasersko rezanje kisikom i lasersko rezanje isparavanjem.



Slika 28. Princip rezanja laserom [8]

### 7.1. Lasersko rezanje taljenjem

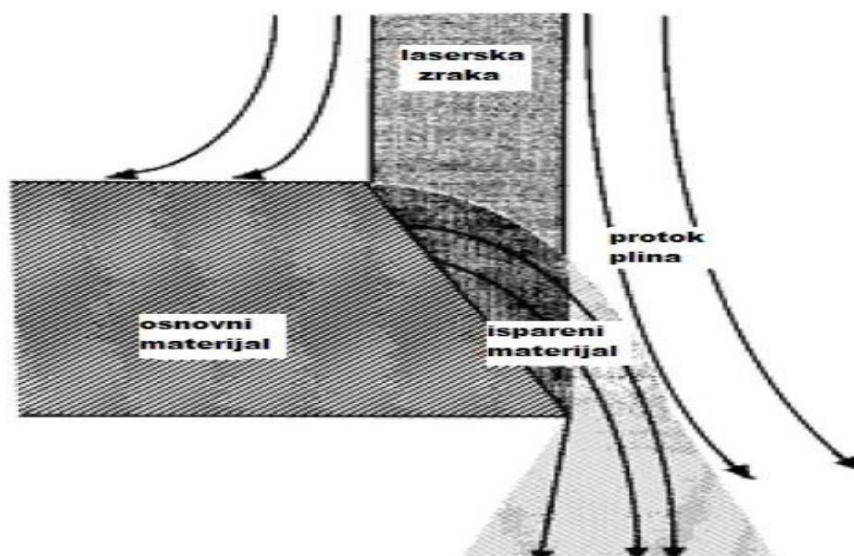
Laserska zraka fokusirana na obradak dovodi do taljenja materijala u zarezu, a mlaz inertnog plina pod visokim pritiskom otpuhuje rastaljeni materijal. Uloga inertnog plina osim otpuhivanja taline je da štiti talinu reza od vanjskih nečistoća i da štiti lasersku sapnicu. Inertni plin koji se koristi je uglavnom dušik ili argon, a moguća je i kombinacija jednog i drugo plina. U ovom procesu laserska zraka je jedini izvor topline koja svojom izrazitom snagom tali materijal. Ovakav postupak laserskog rezanja može se primjeniti kod svih metala. Prednost ovog postupka je da nema oksida, a otpornost na koroziju je ista kao i kod osnovnog materijala. Zbog manjeg unosa energije širina reza i ZUT-a je vrlo mala. Kvaliteta reza je velika, ali je brzina rezanja manja u usporedbi s postupcima rezanja s aktivnim plinom. Kako bi se izbjegao srh na rubovima reza potrebno je upotrijebiti visoki tlak inertnog plina koji je iznad 10 bara. Slika prikazuje postupak laserskog rezanja taljenjem.



Slika 29. Lasersko rezanje taljenjem [8]

## 7.2. Lasersko rezanje isparavanjem

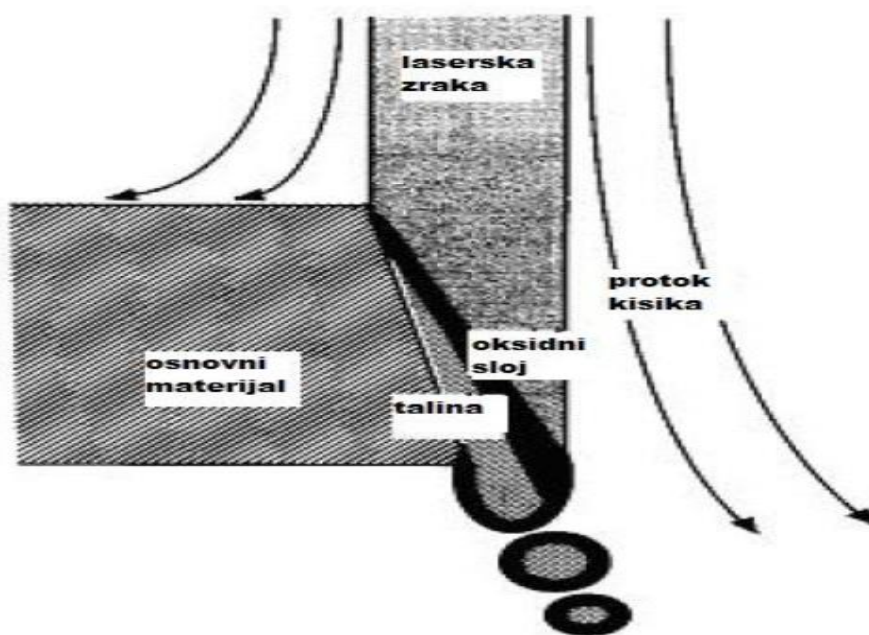
Laserski snop zagrijava materijal što dovodi do isparavanja materijala u zoni reza. Kako bi se izbjegla kondenzacija materijala u rezu koristi se mlaz plina kojim se ispuhuje ispareni materijal. Plin za rezanje koji se najčešće koristi je zrak ili dušik, a za neke namjene i argon. Ovaj postupak primjenjuje se kod materijala koji nisu taljivi poput: drva, polimera, koža, akrila i neke keramike. Lasersko rezanje isparavanjem je najsporija metoda, ali je prikladna za kompliciranije obradke.



Slika 30. Lasersko rezanje isparavanjem [8]

### 7.3. Lasersko rezanje izgaranjem

Lasersko rezanje izgaranjem koristi dodatni izvor topline koji je nastao egzotermnom reakcijom plina za rezanje i radnog komada. Plin za rezanje je kisik ili mješavina bogata kisikom. Egzotermna oksidacija pomaže pri laserskom rezanju omogućavajući dodatni unos topline što rezultira većim brzinama rezanja u usporedbi s rezanjem inertnim plinom. Laserska zraka zagrijava obradak i stabilizira izgaranje, a pomoćni plin otpuhuje rastaljeni materijal iz zone rezanja i štiti optiku lasera. Lasersko rezanje izgaranjem primjenjuje se kod rezanja nelegiranih i niskolegiranih čelika. Površina reza je oksidirana čime se smanjuje viskoznost i površinska napetost taline, a pojednostavljuje ispuhivanje taline.



Slika 31. Lasersko rezanje izgaranjem (kisikom) [8]

## **8. PARAMETRI OBRADJE LASEROM**

Utjecaj parametara obrade na kvalitetu reza je izrazito velik, tako da je potrebno na njih usmjeriti veliku pažnju. Oni se mogu mijenjati kako bi se poboljšala kvaliteta i postigla tražena svojstva obrade. Najvažniji parametri kod rezanja laserom su: snaga lasera, brzina rezanja, plin za rezanje, žarišna duljina, položaj žarišta u odnosu na sapnicu.

### **8.1. Snaga lasera**

Snaga CO<sub>2</sub> lasera za rezanje može biti do 40 kW, a tipična snaga lasera za rezanje je od 0,5 do 2,5 kW. Impulsni Nd:YAG laseri prosječne snage od nekoliko stotina wata koriste se za precizno rezanje. Deblji limovi režu se primjenom impulsnih ili cw (continuous wave) lasera čija snaga može biti do 6 kW. Kontinuirani valom moguće je postići veće brzine rezanja, ali impulsne zrake imaju prednost kad su u pitanju precizna rezanja finih komponenti, jer daju visoku vršnu snagu u kratkim intervalima koja omogućuje potrebno zagrijavanje. Nižom prosječnom snagom omogućeno je sporije odvijanje procesa uz efektivnije ispuhivanje rastaljenog materijala, te u konačnici boljom kvalitetom reza.

### **8.2. Brzina rezanja**

Brzina rezanja se određuje prema vrsti i debljini materijala koji se obrađuje. Povećanjem brzine smanjuje se gubitak energije u zoni rezanja čime se izravno utječe na iskoristivost procesa. Dobra kvaliteta reza postiže se pravilnim odabirom brzine rezanja. Maksimalnom brzinom rezanja dobit ćemo rez bez srha, ali će biti povećana hrapavost. Treba se težiti optimalnoj brzini kojom ćemo dobiti rez bez srha s dobrom hrapavošću. Brzina rezanja je obrnuto proporcionalna debljini materijala koji se obrađuje.

### **8.3. Plin za rezanje**

Plin za rezanje ima nekoliko važnih funkcija koje osiguravaju pravilan proces rezanja. U procesu rezanja sudjeluju inertni i aktivni plin. Uloga inertnog plina (dušik) je da ispuhuje rastaljeni materijal, a da se pri tome kapljice ne otvrdnu s donje strane reza. Aktivni plin za rezanje (kisik) sudjeluje u egzotermnoj reakciji s materijalom. Protokom plina štiti se žarišna optika od štrcanja i hladi rub reza čime se smanjuje zona utjecaja topline (ZUT).

### **8.4. Žarišna duljina**

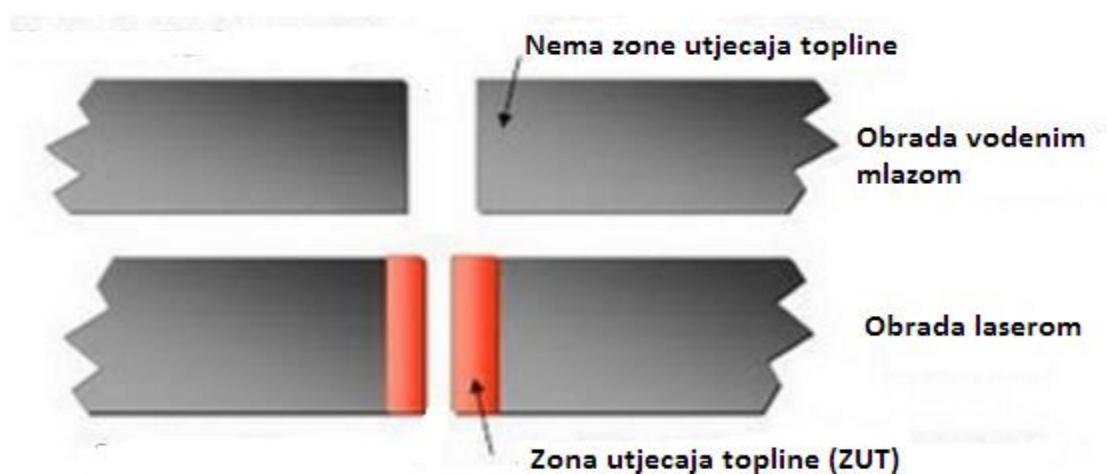
Žarišna duljina leće definira promjer žarišta, pa će leća s kraćom žarišnom duljinom fokusirati snop na manji promjer žarišta. Što je manja žarišna duljina, laserska zraka će biti veće gustoće snage.

### **8.5. Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada**

Kao i kod ostalih parametara bitno je postići optimalan položaj žarišta kako bi se postigla tražena kvaliteta reza. Optimalan položaj žarišta kod rezanja s inertnim plinom je kod donje strane površine materijala. Takvim odabirom se ostvaruje širi rez što olakšava ispuhivanje taline iz zone rezanja. Kako bi se postigao pravilan položaj žarišta i razmak sapnice od radnog komada koriste se senzori za kontrolu položaja žarišta i sapnice od obratka.

## 9. USPOREDBA POSTUPKA OBRADE VODENIM MLAZOM I LASERSKOM OBRADOM

U današnje vrijeme, pažljiv izbor tehnologije obrade materijala znatno može utjecati na kvalitetu obrađivane površine i trošak obrade. Jedna od početnih operacija u proizvodnji je rezanje materijala. Rezanje se razvijalo od klasične tehnologije bazirane na plastičnoj deformaciji (škare) i tehnologijama s reznim materijalima (rezne ploče, tračne pile). Nekonvencionalni postupci su razvijani prema dogovoru zbog povećanih zahtjeva točnosti. Rezanje materijala moguće je raznim obradnim postupcima, ali danas je primjena nekonvencionalnih postupaka obrade laserom i vodenim mlazom u samome vrhu za potrebe rezanja u industriji. Pri odabiru obrade važno je znati koji će se materijali obrađivati i za koju namjenu kako bi se mogla definirati kvaliteta reza. Ukoliko je moguće neki materijal obraditi (rezati) laserom, obrada laserom je ekonomičnija nego obrada vodenim mlazom. Cijena sata rada oba stroja je približno ista, cijena pogonskih sredstava kod lasera je malo niža, a nabavna cijena lasera nešto viša. Obrada laserom je znatno brža nego kod vodenog mlaza te je u osnovi odluka u prilog lasera. Prilikom obrade metala laserom na području reza nastaje uska zona utjecaja topline (ZUT) koja nastaje uslijed djelovanja visoke toplinske energije laserskog snopa na materijal. Takvo tretiranje materijala može dovesti do promjene strukture i mehaničkih svojstava materijala, što je nepoželjno. Za obradke koji ne smiju biti izloženi zoni utjecaja topline rezanje se mora izvršiti vodenim mlazom.



Slika 32. Prikaz zone utjecaja topline pri obradi laserom

Vodenim mlazom moguće je rezati gotovo sve metale osim kaljenog stakla, dok je rezanje laserom ograničeno na konstrukcijske čelike, nehrđajuće čelike i aluminij. Debljina materijala također ograničava obradu laserom jer je moguće rezanje metala do 25 mm ovisno o vrsti materijala, dok je vodenim mlazom moguće rezanje metala debljine i do 100 mm. Laser je precizniji, a rez uži tako da je i manji gubitak materijala nego kod vodenog mlaza.



Tablica 7. Usporedba mogućnosti obrade laserom i vodenim mlazom

R. br.	Materijal obradka	Debljina	Laser	Vodeni mlaz
1.	Konstrukcijski čelik	$\leq 20$ mm $\leq 100$ mm	+ ■	- +
2.	Nehrđajući čelik	$\leq 8$ mm $\leq 100$ mm	+ ■	- +
3.	Aluminij	$\leq 6$ mm $\leq 100$ mm	+ ■	- +
4.	Sjajni obojeni metali (bakar, mesing)	$\leq 100$ mm	■	+
5.	Titan	$\leq 100$ mm	■	+
6.	Staklo	$\leq 100$ mm	■	+
7.	Kamen, keramika	$\leq 100$ mm	■	+
8.	Plastične mase, acryl	$\leq 100$ mm*	■	+
9.	Guma, pjenasti materijali	$\leq 100$ mm*	■	+
10.	Prirodni materijali	$\leq 100$ mm	■	+

Legenda:

+ obrada moguća naročito dobro

- tehnički obrada moguća, ali nije ekonomična

■ obrada tehnički nije moguća ili je preskupa

\* kod ovih materijala pri laserskoj obradi nastaju otrovne vodene pare

Nedostatak rezanja laserom je zaostali materijal oko ruba reza za razliku od rezanja vodenim mlazom pri kojem dobijemo čisti rez bez potrebe za naknadnom doradom rubova reza.



Slika 33. Element izrezan abrazivnim vodenim mlazom





Slika 34. Element izrezan laserom

Danas se mnogo pažnje pridaje ekolozičnosti obrade. Prilikom obrade vodenim mlazom nema stvaranja dima pri obradi, a ukoliko se koristi abraziv moguće ga je reciklirati i ponovno iskoristiti pri sljedećoj obradi. Materijali skloniji nastanku koroziji nakon obrade se moraju zaštititi od korozije. Laserskom obradom dolazi do stvaranja dima i otrovnih para kod materijala poput: plastičnih masa, acryla, gume, pjenastih materijala.

## 10. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela završnog rada je prikazati tehnologiju izrade priрубnice na stroju za rezanje abrazivnim vodenim mlazom, te definirati nastajanje hrapavosti obrađene rezne površine. Priрубnica je izrađena u tvrtki Konid-proces na stroju za abrazivno vodeno rezanje. Pogon tvrtke Konid-proces smješten je u Zagrebu, Prigornica 2. Konid proces je tvrtka čije se znanje i iskustvo temelji na dugogodišnjem radu u proizvodno metaloprerađivačkim djelatnostima. Iskustvo koje je tvrtka stekla kroz rad širokog su spektra i odnose se na konstruiranju opreme u prehrambenoj industriji, vođenju i nadzoru montažnih radova strojarskih instalacija, razradi tehnoloških procesa u proizvodnji strojarskih instalacija i opreme.

### 10.1. Oprema za rezanje

Sustav za vodeno rezanje sastoji se od stroja tvrtke „Water Jet Sweden“ oznake NC 3015 E, pumpe KMT-Streamline SLV-50 i upravljačkog sustava. Ovaj stroj je namijenjen za manje serije viskopreciznog 2D rezanja. Kod strojeva X-serije tvrtke Water Jet Sweden, moguća je nadogradnja druge abrazivne rezne glave na gredi stroja. Okvir stroja je zavaren, a spremnik za hvatanje mlaza je izrađen od nehrđajućeg čelika. Dimenzije radnog prostora stroja su: 3200 x 1750 mm. CNC kontrolni sustav je FANUC. Spremnik abraziva je smješten uz stroj, a regulacija protoka abraziva vrši se ručno odabirom blendi različitih promjera.



Slika 35. Stroj WJS NC 3015 E



Slika 36. Upravljačka jedinica stroja

Za generiranje visokoga tlaka pri obradi vodenim mlazom korištena je pumpa Streamline SL-V 50 američkog proizvođača KMT Waterjet.



Slika 37. Pumpa Streamline SL-V 50

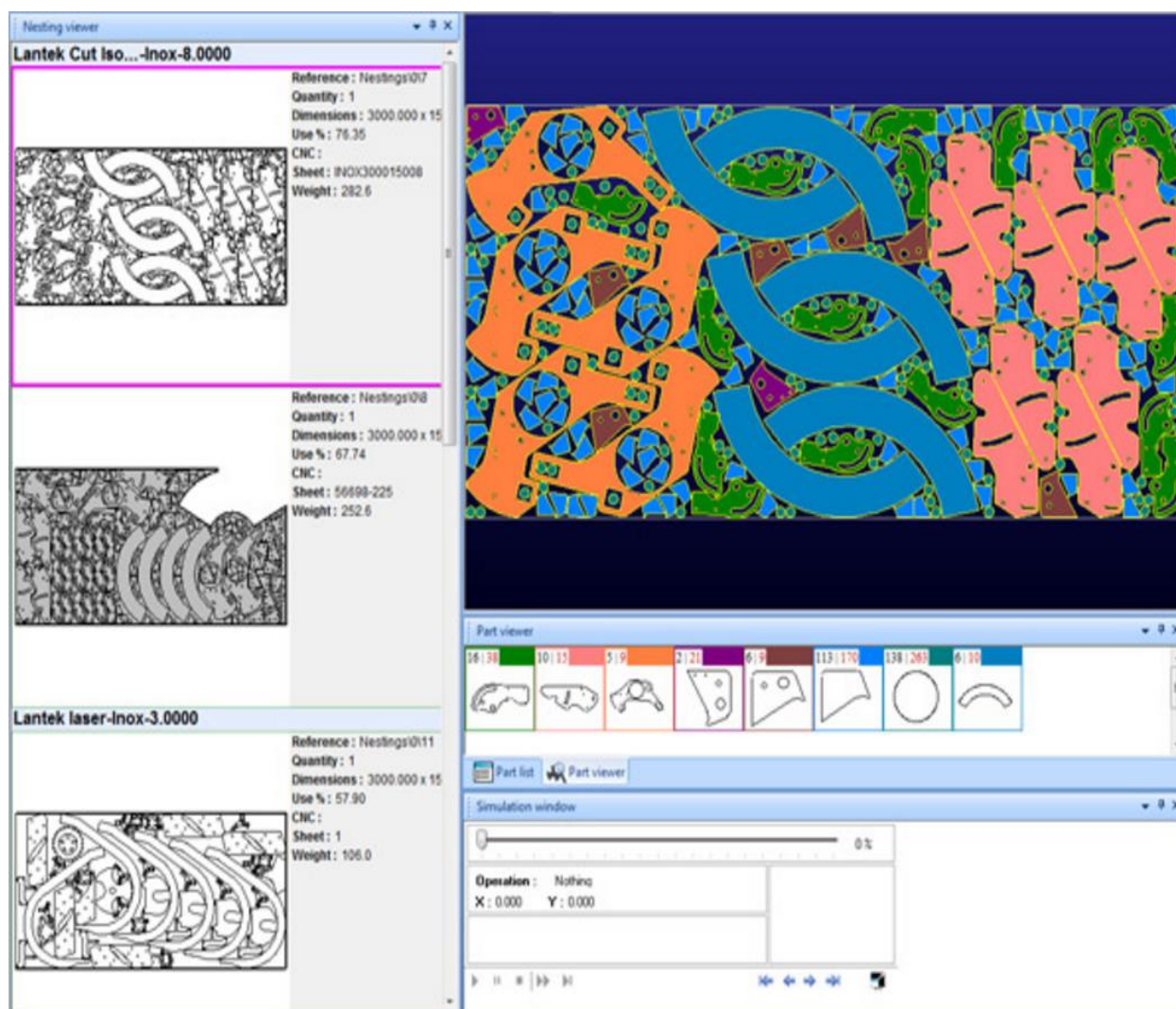
Tablica 8. Tehnička specifikacija pumpe

Snaga pumpe	37kW
Maksimalan tlak	4137 bar
Maksimalan protok vode pri tlaku od 3792 bar-a	3.79 litara po minuti
Maksimalan promjer vodene mlaznice	0.355 mm
Razina buke	72.5 dB
Radna temperatura okoline	Min. 5° C Max. 40° C
Dužina	1.7 m
Visina	917 mm
Masa pumpe	1315 kg

## 10.2. Tehnološki proces izrade prirubnice

Razvojem tehnologije većina klasičnih alatnih strojeva danas je računalno upravljano što omogućava postizanje zahtjeva koje nameće suvremena proizvodnja. Početak samoga procesa uključuje razradu crteža u programu za dizajniranje predmeta obrade.

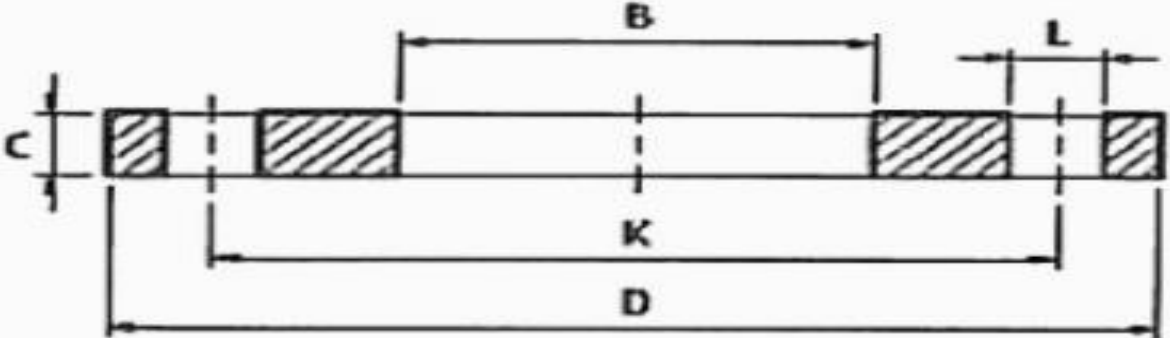
Razrađeni crtež u mjerilu 1:1 unosi se u program Lantek kojim se vrši daljnja priprema procesa. Lantek Expert Cut je CAD/CAM program posebno prilagođen za programiranje strojeva za obradu metala rezanjem. Takav program omogućuje optimizaciju parametara obrade te kalkulaciju cijene, a ukoliko se izvodi rezanje većeg broja istih komada automatsko pozicioniranje omogućuje bolju iskoristivost materijala pločevine iz koje se izrezuje što je prikazano na slici 38.



Slika 38. Primjer pozicioniranja programom Lantek radi veće iskoristivosti ploče

Tablica 9. Dimenzije ravne prirubnice

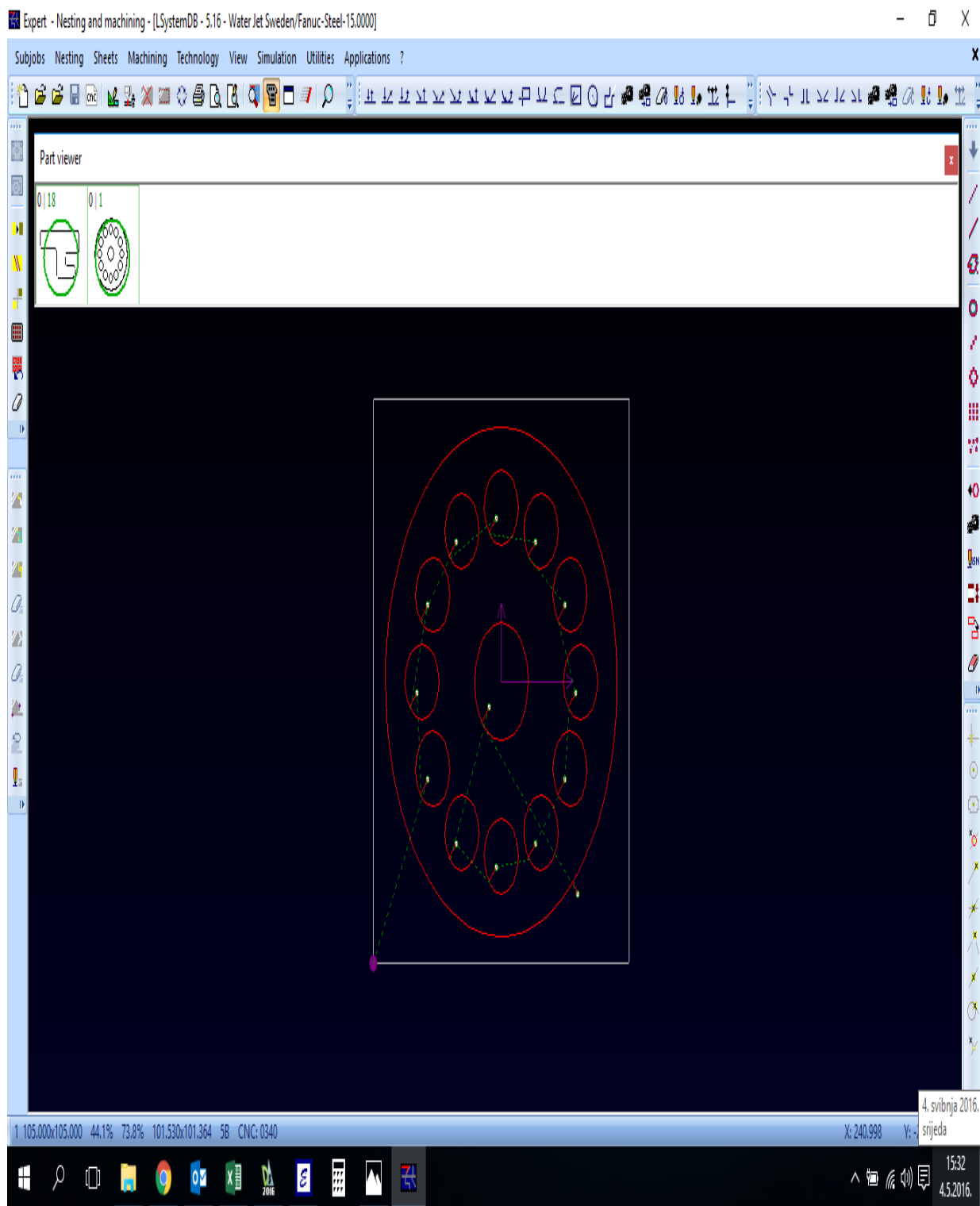
D	K	L	B	C	Broj rupa	Vijak
95	65	14	22	14	12	M12



Prirubnica je element koji najčešće služi za izvođenje cijevnih spojeva. Cijevne prirubnice se koriste na mjestima gdje se cjevovodi, instrumenti, ventili, oprema moraju rastavljati radi održavanja. Prirubnički spoj je sklop od tri različite komponente: prirubnice, brtve i vijka. Kako bi međusobna veza dviju prirubnica bila nepropusna u spoj se umeće brtva. Ukoliko su vijci koji osiguravaju spoj korodirali jednostavno se odrežu. Prirubnice su obično izrađene kovanjem, a u rjeđim slučajevima lijevanjem ili iz ploča.

Na slici 39. prikazan je izgled crteža prirubnice u programu Lantek koja će biti obrađena na stroju za abrazivno vodeno rezanje. Crvenom linijom je označena geometrija obrade prirubnice koja će biti izrezana, dok je zelenom isprekidanom linijom prikazano dostavno gibanje. Nultočka obrade označena je rozom točkom gdje će se započeti sa obradom. Prema crtežu obrada se započinje sa rezanjem manjih provrta, i to iz njihovog središta (bijeli kružić) jer bi abrazivni vodeni mlaz mogao oštetiti materijal pri svom početnom prodoru zbog svog visokog pritiska.





Slika 39. Izgled crteža u programu Lantek

Definiranjem parametara obrade i njihovim unošenjem u program biti će automatski izračunate posmične brzine rezanja.

Tablicom 10. prikazani su parametri obrade koji se unose u program, te šalju na upravljačku jedinicu stroja za vodeno rezanje.

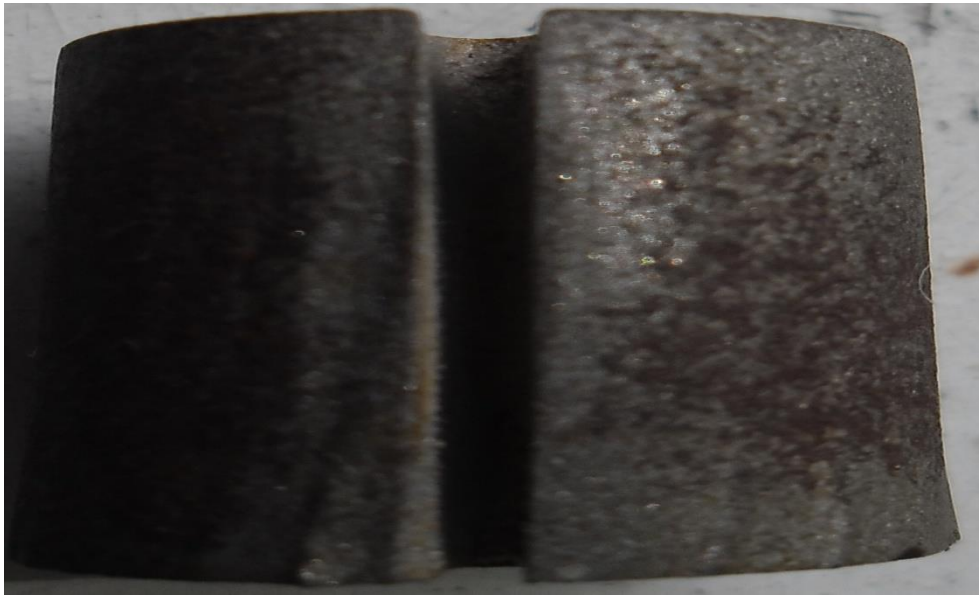
Tablica 10. Parametri obrade

Debljina materijala	15 mm
Materijal	Č 0245
Tlak	3250 bar
Promjer vodene mlaznice	0,28 mm
Promjer abrazivne mlaznice	0,76 mm
Vrsta pijeska	Garnet 80 Mesh
Udaljenost mlaznice od obradka	2,5 mm
Protok abraziva	0,320 kg/min

Nakon definiranja parametara operater stroja namješta pločevinu iz koje će biti izrezana prirubnica. Pokretanje obrade vrši se putem upravljačke jedinice. Obrada se prati na sučelju upravljačke jedinice, a po potrebi moguće je upravljati parametrima obrade. Sučelje upravljačke jedinice prikazano je na slici 40.







Slika 42. Prednji pogled sužavanja reza

Posmična brzina obrade provrta promjera 14 mm je približno 75 mm/min dok su posmične brzine rezanja središnjeg provrta i vanjskog promjera nešto veće. Brzina obrade će biti veća, ako su linije koje se obrađuju ravne. Provrti većeg promjera imat će formu bližu ravnom rezu pa će ih program tako klasificirati, a njihova obrada će biti brža. Središnji provrt je rezan posmičnom brzinom od 105 mm/min, a vanjski promjer obradka rezan je posmičnom brzinom od 130 mm/min. Kako bi se zadovoljila kvaliteta hrapavosti potrebno je definirati optimalnu posmičnu brzinu rezanja jer ima velik utjecaj na krajnju kvalitetu, ali i na samu ekonomičnost obrade.



Slika 43. Rezanje provrta promjera 14 mm



Nakon što je prirubnica izrezana mora se oprati mlazom vode i osušiti zrakom ukoliko je materijal podložan hrđanju.



Slika 44. Izrezana prirubnica



Slika 45. Pogreška nastala pri obradi promjera promjera 14 mm

Prilikom obrade abrazivnim vodenim mlazom mnogo je faktora koji mogu utjecati na nastanak pogreški. Na slici 45 prikazana je pogreška nastala sa donje strane obradka zbog naglog smanjenja posmične brzine rezne glave pri njegovom zakretanja u smjeru kružnice što je uzrokovalo nepotpuno odvajanje materijala zbog zaostajanja mlaza. Zbog primjene


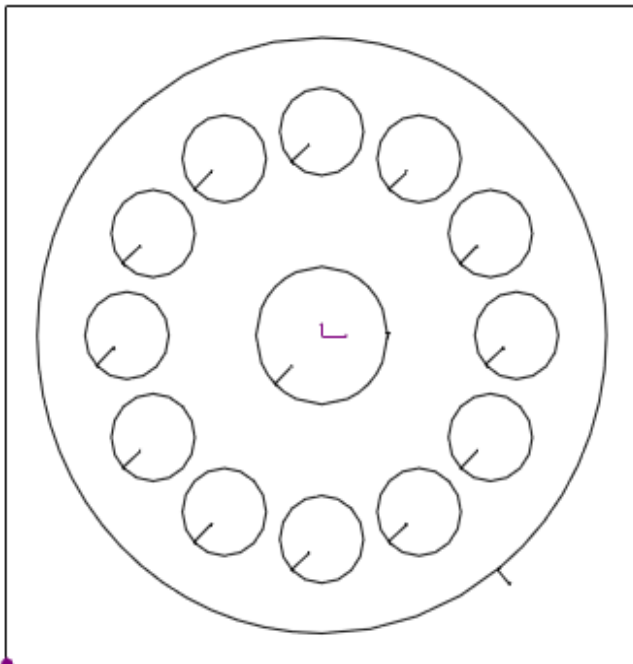
manje posmične brzine rezanja manjih provrta njihova površina je manje izbrazdana i finija. Optimizacijom parametara obrade poput posmične brzine rezanja, promjera cijevi za fokusiranje, tlaka i maseni protok abraziva može se dobiti kvalitetnije obrađena površina sa manje brazdi nastalih pod djelovanjem zaostajanja abrazivno vodenoga mlaza. Ukoliko se želi postići kvalitetno obrađena površina, pri tome moramo voditi računa o parametrima obrade. Takva obrada vremenski će duže trajati pa je za rezanje abrazivnim vodenim mlazom ekonomičnije rezanje obradaka ravnijih linija jer će obrada biti fluentnija bez mnogo usporavanja. Debljina materijala također ima velik utjecaj na odabir parametara pa će posmična brzina rezanja biti manja, maseni protok abraziva veći kao i tlak obrade da bi se u potpunosti moglo izvršiti odvajanje materijala.



Slika 46. Zaostajanje mlaza prilikom obrade prirubnice

Tipična pojava pri obradi vodenim mlazom je zaostajanje mlaza. Zaostajanje mlaza je posljedica primjene prevelike brzine rezanja. Takva površina je hrapava i izbrazdana što je prikazano na slici 46. Kod debljih materijala rezanih većom posmičnom brzinom dovest će do nastanka konusnog oblika obradka.

Referentnim listom prikazanim na slici 47 može se vidjeti da je za izradu jedne prirubnice promjera 95 mm i debljine 15 mm potrebno 11 minuta i 57 sekundi, a masa izrezanog elementa je 0,576 kg.

	<b>Ref</b>	5B			<b>Quantity</b>	1
	<b>Job</b>	5.16				4.5.2016. 14:54:56.00
	<b>CNC</b>	0340	105	x 105	x 15	
	<b>User data 3</b>					
						
<b>Machine</b>	Water Jet Sweden/Fanuc		<b>Weight</b>		1.306	kg
<b>Material</b>	Steel		<b>X</b>		101.53	
<b>Total time</b>	00:11:57.87		<b>Y</b>		101.364	
<b>User data 1</b>			<b>Use (%)</b>		44.089	
<b>User data 2</b>			<b>Remnant (%)</b>		73.805	59.737
<b>#</b>	<b>Reference</b>	<b>Sheet</b>	<b>Total</b>	<b>Missing</b>	<b>Weight</b>	<b>Dimensions</b>
7	Hrvanje Lončarević	1	1	0	0.576	95 x 95

Slika 47. Referentni list programa Lantek

## 11. ZAKLJUČAK

Porastom kriterija tržišta po pitanju kvalitete i tehnološkičnosti proizvoda nužna je tehnologija koja će zadovoljiti sve uvjete kako bi se oni ostvarili. Razvojem tehnologije i inovacija implementirane su nove tehnologije obrade odvajanjem čestica. Jedna od tih tehnologija je obrada vodno-abrazivnim mlazom. Njenom primjenom omogućeno je rezanje sofisticiranih oblika svih vrsta materijala bez unošenja topline u materijal i zaostalih naprezanja. Ova fleksibilna i moderna tehnologija pogodna je za visokoserijsku proizvodnju pri kojoj nije potrebna naknadna završna obrada kod izrade složenih obradaka. Visokoprecizni mlaz uz pravilno definirane parametre ostvaruje kvalitetu obrade zavidne razine uz minimalni gubitak materijala što je izrazito važno kod rezanja skupih materijala poput titana. Kompariranjem klasične obrade i obrade vodenim mlazom troškovi alata su smanjeni budući da se za sve operacije primjenjuje vodeni mlaz, a po potrebi dodaje abraziv koji u cjelini čine moćno oruđe za obradu svih vrsta materijala. Trajanje obrade ovom metodom je veoma kratko, a zbog minimalnih sila pri obradi otpada i stezanje obradka.

Prednosti ove obrade i tehnološki proces prikazan je eksperimentalnim dijelom zadataka pri izradi priрубnice u tvrtki Konid-proces kojim je dokazano kako obrada vodenim mlazom zadovoljava sve kriterije kvalitete propisane tehničko tehnološkom dokumentacijom. Analizom parametara obrade može se zaključiti da je kvaliteta površine različita po dubini reza, a velik utjecaj na nju ima posmično gibanje obrade. Također je vidljivo kako povećanjem udaljenosti mlaznice od obrađivane površine dobiva hrapaviju strukturu tako da je potrebno udaljenost mlaznice održavati na optimalnoj visini. Budući da ova obrada zahtjeva visoki tlak radi ostvarivanja kvalitete mlaza. Povećanje radnog tlaka vode dovodi do fragmentacije čestica abraziva što dovodi do finije rezne površine sa manje izraženim brazdama. Kako bi se ostvarila ravnoteža kvalitete obrađene površine, proizvodnosti te u konačnici ekonomičnosti same obrade potrebno je odabrati optimalne parametre jer se oni ne mogu ostvariti malom posmičnom brzinom obrade i visokim tlakom obrade. Unatoč relativno visokim investicijskim troškovima ova ekološki prihvatljiva suvremena tehnologija ima velik potencijal za daljnje usavršavanje i sve veću primjenu u strojogradnji.

## 12. LITERATURA

- [1] <http://www.waterjets.org/>
- [2] <http://www.flowwaterjet.com/Learn/Benefits-of-Waterjet.aspx#versatility>
- [3] [www.wardjet.com/waterjet-university/](http://www.wardjet.com/waterjet-university/)
- [4] <http://www.kmtwaterjet.com/>
- [5] <http://waterjetsweden.com/>
- [6] Sergej Hloch, Jan Valiček, Antun Stoić, Dražen Kozak, Ivan Samardžić, Jozef Novak-Marcinčin, Vladimir Modrak: „Rezanje mlazom vode“, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2011.
- [7] Mario Mandir: Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [8] Marko Vlahov: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [9] Ante Pavić: Tehnologija( Obrada odvajanjem čestica), Veleučilište u Karlovcu, 2013.
- [10] Charles L. Caristan: „Laser Cutting Guide for Manufacturing“ , Michigan, 2004.
- [11] Tihomir Glatki, Matija Lacković, Sebastijan Kos, Jovica Lončar: „Obrada vodenim i abrazivnim mlazom“, Tehnički glasnik 8, 3(2014), 245-251